



Titre: Planification tactique des grands projets d'ingénierie et de construction
Title:

Auteur: Kaouthar Cherkaoui
Author:

Date: 2017

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Cherkaoui, K. (2017). Planification tactique des grands projets d'ingénierie et de construction [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/2539/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2539/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Pierre Baptiste, & Robert Pellerin
Advisors:

Programme: Doctorat en génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PLANIFICATION TACTIQUE DES GRANDS PROJETS D'INGÉNIERIE ET DE
CONSTRUCTION

KAOUTHAR CHERKAOUI

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AVRIL 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

PLANIFICATION TACTIQUE DES GRANDS PROJETS D'INGÉNIERIE ET DE
CONSTRUCTION

présentée par : CHERKAOUI Kaouthar

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. BOURGAULT Mario, Ph. D., président

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, membre et directeur de recherche

M. PELLERIN Robert, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. GAMACHE Michel, Ph. D., membre

M. LAURAS Matthieu, Doctorat, membre externe

DÉDICACE

À mes chers parents

À mon cher mari

À mes sœurs et mon frère bien aimés

REMERCIEMENTS

Mon projet de doctorat n'aurait pu être accompli sans la contribution de nombreuses personnes. Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mes deux directeurs de recherche Pr. Pierre Baptiste et Pr. Robert Pellerin pour leur encadrement de qualité, leur disponibilité, leur soutien, leur confiance et leurs grandes qualités humaines. Je tiens également à remercier le Pr. Alain Haït pour l'intérêt qu'il a manifesté pour mes travaux et sa contribution appréciée dans leur réalisation.

J'aimerais également remercier les membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer ma thèse, à savoir le Pr. Mario Bourgault, le Pr. Michel Gamache, le Pr. Matthieu Luras et le Pr. Michel Perrier.

Je tiens à remercier mes collègues de travail à la chaire de recherche Jarislowsky/SNC-LAVALIN et au département MAGI pour leur soutien et amitié. Je cite en particulier Nathalie Perrier, assistante de recherche à la chaire pour ses conseils et directives tout au long de mon doctorat, les anciens étudiants maintenant diplômés François Berthaut, Bassem Bouslah et Georges Baydoun pour leur intérêt pour mes travaux, leurs conseils et les échanges et discussions intéressantes que nous avons eu et Guillaume Bouvignies pour l'aide qu'il a fourni à ma recherche durant son stage à la chaire. Je remercie également Gabriel Yan, Fadwa Chtita, Sergio Garon et Sean Grogan pour leur sympathie et leur collaboration.

Finalement je tiens à remercier mes parents, mes sœurs, mon frère et ma tante pour leur grand soutien affectif et leurs conseils, notamment mon père qui a été la personne à me suggérer et me persuader de faire mon doctorat au Canada.

Enfin, je tiens à adresser un remerciement spécial à mon mari pour son soutien, sa patience et son accompagnement tout au long de ce projet.

RÉSUMÉ

Les grands projets d'ingénierie et de construction sont planifiés de façon hiérarchique afin de faire face à leur grande complexité. Ainsi, des échéanciers agrégés sont développés durant les premières phases de projet pour un large horizon et des échéanciers plus détaillés sont développés au fur et à mesure que le projet avance et que les informations se précisent. Les niveaux de planification agrégés sont caractérisés par des degrés élevés d'incertitude, notamment le niveau de planification tactique où des décisions importantes doivent toutefois être prises relativement à la détermination du budget de projet et des dates jalons et d'échéance. Au niveau de planification tactique, les pratiques courantes se basent sur l'ajout de sécurité dans les échéanciers tactiques de façon subjective et non fondée sur des méthodes scientifiques. Les niveaux d'agrégation sont également établis de façon arbitraire. Quant à la littérature scientifique, peu de modèles tactiques considérant l'incertitude ou évalués dans un contexte réaliste ont été proposés. En particulier, l'incertitude liée à l'agrégation des capacités est négligée dans la littérature. D'un autre côté, les hypothèses des approches proactives d'ordonnancement proposées pour le problème *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) du niveau opérationnel ne sont pas adaptées aux hypothèses du problème *Rough-Cut Capacity Planning* (RCCP) du niveau tactique. Dans cette thèse, nous essayons de répondre à ces problématiques en proposant des approches de planification tactique adaptées au contexte complexe, incertain et dynamique des grands projets d'ingénierie et de construction. Nous commençons par proposer un modèle de base qui permet d'intégrer plusieurs niveaux d'agrégation des données à travers la variation des durées des périodes. L'évaluation des résultats dans un contexte incertain et dynamique a permis de relever d'une part l'avantage de l'agrégation des périodes dans la réduction considérable des temps de calcul et d'autre part l'impact négatif qu'elle engendre sur la robustesse des estimations. Nous avons proposé une approche de planification proactive destinée à la variante *time-driven* du problème RCCP facilement exploitable en pratique et qui permet d'améliorer grandement la robustesse du coût de projet estimé sous l'influence des incertitudes liées aux charges de travail et à l'agrégation des capacités. Nous avons également proposé des approches proactives destinées à la variante *resource-driven* du problème RCCP qui permettent d'améliorer la robustesse des dates jalons y compris la date d'échéance du projet sous l'influence des incertitudes citées plus haut. La

comparaison de ces approches montre que la stratégie gagnante de protection des dates jalons contre les dépassements est de concentrer les marges de temps à la fin des chemins menant à ces dates.

ABSTRACT

Large scale engineering and construction projects are planned hierarchically in order to face the high level of complexity inherent to them. As such, aggregate schedules are generated for a large horizon during the first phases of the project and detailed schedules are developed as the project advances and more accurate information becomes available. The aggregate planning levels are characterized by a high level of uncertainty, especially the tactical planning level where important decisions are made concerning the project budget, milestones and due dates. At the tactical planning level, common practices are based on adding security in tactical schedules in subjective and non-scientifically based ways. Aggregation levels are also arbitrarily established. As for the scientific literature, very few tactical planning models explicitly consider uncertainty or evaluate their models in a realistic context. In particular, the uncertainty related to the aggregation of capacity estimates is neglected in the literature. On the other hand, the proactive scheduling approaches intended for the Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) at the operational level are based on different hypotheses than the ones of the Rough-Cut Capacity Planning (RCCP) problem intended for the tactical planning level. In this thesis, we try to address these issues by proposing tactical planning approaches appropriate to the complex, uncertain and dynamic context of large scale engineering and construction projects. We begin by proposing a base model that integrates different planning levels by varying the durations of the periods. The results evaluation in an uncertain and dynamic environment shows the considerable reduction of the computational times when aggregating the periods while a decrease in the robustness of the estimations is noticed. We have therefore proposed an easily implementable proactive planning approach for the time-driven variant of the RCCP problem that considerably improves the robustness of cost estimations in presence of the uncertainties related to the aggregation of capacities and to work contents. We have also proposed a number of proactive approaches for the resource-driven variant of the RCCP problem that improve the robustness of project milestones including the due date of the project in the presence of the uncertainties cited above. The comparison of these approaches shows that the best protection strategy of the milestones against delays is to concentrate time buffers at the end of the paths leading to these milestones.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES	XX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE	5
2.1 Contexte des grands projets d'ingénierie et de construction.....	5
2.2 Planification des grands projets d'ingénierie et de construction.....	8
2.3 Revue de littérature scientifique des modèles et méthodes de planification proposés pour les différents niveaux hiérarchiques de planification.....	11
2.3.1 Structure de planification hiérarchique proposée en littérature scientifique	11
2.3.2 Le problème RCCP « Rough-Cut Capacity Planning » associé au niveau tactique ..	16
2.3.3 Le problème RCPSP « Resource-Constrained Project Scheduling Problem » au niveau opérationnel	25
2.4 Considération de l'incertitude dans le processus de planification	27
2.4.1 En pratique	27
2.4.2 Modèles d'ordonnancement de projets considérant l'incertitude	30
2.5 Analyse critique de la littérature	33

2.6	Conclusion.....	37
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....		38
3.1	Objectifs et hypothèses de recherche	38
3.2	Démarche de recherche	39
3.3	Cadre expérimental	42
3.3.1	Définitions des appellations d'échéanciers	42
3.3.2	Description du processus d'expérimentation	44
3.4	Conclusion.....	46
CHAPITRE 4 MODÈLE RCCP DÉTERMINISTE INTÉGRANT PLUSIEURS NIVEAUX DE PLANIFICATION		48
4.1	Description formelle du problème.....	48
4.2	Modélisation mathématique du problème	49
4.2.1	Contraintes de positionnement des dates par rapport aux périodes	50
4.2.2	Contraintes déterminant les durées des lots dans les périodes	51
4.2.3	Contraintes de temps et de séquence.....	52
4.2.4	Contraintes de charge et de capacité	53
4.2.5	Domaines de définition des variables.....	54
4.2.6	Fonction-objectif	54
4.3	Génération d'instances	55
4.3.1	Problème time-driven RCCP.....	55
4.3.2	Problème resource-driven RCCP	55
4.4	Expérimentation pour le problème resource-driven RCCP.....	58
4.4.1	Analyse par classe d'instances	64
4.4.2	Impact du niveau de variabilité des charges de travail sur les résultats	67

4.4.3	Nombre de réplifications nécessaire	67
4.5	Expérimentation pour le problème time-driven RCCP	68
4.5.1	Analyse par classe d'instances	71
4.5.2	Impact du niveau de variabilité des charges de travail sur les résultats	81
4.6	Conclusion.....	83
CHAPITRE 5 APPROCHE DE PLANIFICATION PROACTIVE POUR LE PROBLÈME TIME-DRIVEN RCCP SOUS INCERTITUDE.....		86
5.1	Description du problème	86
5.2	Description de l'approche proactive	89
5.3	Définition des tailles des réserves de capacité	92
5.4	Résultats des tests expérimentaux	98
5.4.1	Impact du niveau de variabilité des charges de travail sur les résultats	102
5.5	Conclusion.....	103
CHAPITRE 6 APPROCHES DE PLANIFICATION PROACTIVE POUR LE PROBLÈME RESOURCE-DRIVEN RCCP SOUS INCERTITUDE.....		105
6.1	Description du problème	105
6.2	Détermination des facteurs de risque	106
6.2.1	Expérimentation	110
6.3	Description des approches proactives proposées	115
6.3.1	Approche proactive AgR_MgT%	116
6.3.2	Approche proactive AgR_MgSk%.....	117
6.3.3	Approche proactive AgR_MgSkCf%.....	117
6.3.4	Approche proactive AgR_MgSkFl%	118
6.3.5	Approche proactive AgR_MgSkFl.....	119

6.3.6	Approche proactive AgR_MgCap.....	119
6.3.7	Approche proactive AgR_MgCmax.....	120
6.3.8	Approche proactive AgR_Linear	120
6.4	Résultats des tests expérimentaux	121
6.4.1	Configuration	121
6.4.2	Résultats de comparaison des approches proactives	122
6.4.3	Résultats de comparaison avec le modèle désagréé	138
6.5	Conclusion.....	142
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		145
BIBLIOGRAPHIE		152
ANNEXES		159

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1: Matrice générique de classification des échéanciers, adaptée de [AACE International, 2010a]	11
Tableau 2-2: Structure de planification hiérarchique pour les grands projets d'ingénierie et de construction	15
Tableau 2-3: Littérature pertinente pour le problème de planification tactique des projets	24
Tableau 2-4: Comparaison entre le problème RCCP et le RCPSP standard.....	25
Tableau 4-1: Nomenclature - variables	50
Tableau 4-2: Notations	57
Tableau 4-3: Temps de calcul (en secondes)	59
Tableau 4-4: Analyse de l'impact des paramètres de l'instance sur la fonction de dépassement de durée des deux modèles.....	65
Tableau 4-5: Analyse de l'influence des paramètres de l'instance sur les écarts des durées estimées et réalisées par les deux modèles.....	66
Tableau 4-6: Analyse de sensibilité en fonction du niveau de variabilité des charges de travail ..	67
Tableau 4-7: Coefficient de variation selon le nombre de répliques.....	68
Tableau 4-8: Temps de calcul (en secondes)	69
Tableau 4-9: Résultats moyens sur toutes les instances de projet.....	70
Tableau 4-10: Analyse de l'influence des paramètres de l'instance sur les écarts entre les coûts estimés par les deux modèles	71
Tableau 4-11: Analyse de l'impact des paramètres de l'instance sur la robustesse des deux modèles.....	74
Tableau 4-12: Analyse de l'influence des paramètres de l'instance sur les écarts entre les coûts réalisés par les deux modèles	75
Tableau 4-13: Coûts relatifs moyens par classe d'instance	76

Tableau 4-14: Robustesse des deux modèles selon la mesure $E'(\text{coût}\%)$ par classe d'instance...	80
Tableau 4-15: Comparaison des coûts relatifs par classe d'instance dans les échéanciers de référence et réalisés	80
Tableau 4-16: Paramétrage des niveaux de variabilité des charges de travail	81
Tableau 4-17: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur la robustesse des modèles selon la mesure $E(\text{coût}\%)$	82
Tableau 4-18: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur la robustesse des modèles selon la mesure $E'(\text{coût}\%)$	82
Tableau 4-19: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur les écarts entre les coûts réalisés par les deux modèles.....	83
Tableau 5-1: Écarts de coûts entre les échéanciers de référence agrégés non protégés et les échéanciers de référence désagrégés	93
Tableau 5-2: Tailles optimales des réserves de capacité selon la procédure Proc	94
Tableau 5-3: Écarts de coûts entre les échéanciers de référence agrégés protégés avec les réserves de capacité optimales et les échéanciers désagrégés	94
Tableau 5-4: Écarts de coûts entre les échéanciers de référence agrégés protégés et les échéanciers de référence désagrégés	96
Tableau 5-5: Évolution des écarts de coûts en appliquant une réduction supplémentaire de 1% de la capacité.....	97
Tableau 5-6: Résultats moyens de l'évaluation de la robustesse des modèles avec $E(\text{coût}\%)$	99
Tableau 5-7: Résultats moyens de l'évaluation de la robustesse des modèles avec $E'(\text{coût}\%)$	99
Tableau 5-8: Comparaison des coûts des échéanciers réalisés sans rapporter aux exigences globales en ressources	101
Tableau 5-9: Comparaison des coûts des échéanciers réalisés en rapportant aux exigences globales en ressources	101

Tableau 5-10: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur la robustesse du modèle proactif.....	102
Tableau 5-11: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur les écarts entre les coûts réalisés par le modèle proactif AgR2 et le modèle déterministe Ag2	103
Tableau 6-1: Variables représentant des facteurs de risque potentiels.....	108
Tableau 6-2: Récapitulatif des approches proactives	121
Tableau 6-3: Résultats pour la classe d'instances (N = 50 et K = 3)	125
Tableau 6-4: Résultats pour la classe d'instances (N = 50 et K = 20)	125
Tableau 6-5: Résultats pour la classe d'instances (N = 10 et K = 20)	126
Tableau 6-6: Marges générées par les approches pour protéger la date d'échéance du projet	131
Tableau 6-7: Marges générées par les approches pour protéger les dates de début des LC	134
Tableau 6-8: Durées moyennes dans les solutions de référence des différentes approches	138
Tableau 6-9: Résultats du modèle désagrégé pour la classe d'instances (N = 50 et K = 3).....	139
Tableau 6-10: Résultats du modèle désagrégé pour la classe d'instances (N = 50 et K = 20)	139
Tableau 6-11: Résultats du modèle désagrégé pour la classe d'instances (N = 10 et K = 20)	140
Tableau 6-12: Écarts moyens de la fonction de dépassement des jalons entre les approches agrégées et désagrégées.....	141
Tableau 6-13: Écarts entre les durées optimales des modèles de base Desg et Ag.....	142

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Phases et classes d'échéanciers dans un projet IA(G)C.....	10
Figure 2-2: Structure de planification hiérarchique proposée par De Boer [1998].....	12
Figure 3-1: Démarche de recherche	40
Figure 3-2: Loi de distribution de la charge de travail d'un lot donné	45
Figure 3-3: Diagramme décrivant le processus expérimental	47
Figure 4-1: Positionnement des dates et durées vs. périodes et variables associées	51
Figure 4-2: Les six configurations possibles d'un lot et d'une période	52
Figure 4-3: Construction d'une solution réalisable.....	57
Figure 4-4: Illustration de la mise à jour du vecteur des durées des périodes.....	60
Figure 4-5: Répartition des instances basée sur les écarts de durées dans l'échéancier de référence	62
Figure 4-6: Exemple d'échéanciers de référence d'une instance de projet test	62
Figure 4-7: Répartition des instances basée sur la valeur de la fonction de dépassement de durée pour les modèles Ag et Desg.....	63
Figure 4-8: Répartition des instances basée sur les écarts de durées dans l'échéancier réalisé.....	63
Figure 4-9: Impact des incertitudes sur la robustesse en fonction des paramètres N et K.....	66
Figure 4-10: Comparaison de la robustesse et performance des deux modèles en fonction des paramètres N et K.....	67
Figure 4-11: Planification agrégée avec un coût nul.....	72
Figure 4-12: Augmentation de coût au niveau désagrégré	73
Figure 4-13: Exemple d'échéanciers de référence d'une instance de projet test	73
Figure 4-14: Coûts relatifs estimés par le modèle agrégé en fonction de la mesure E0(coût%) ...	77

Figure 4-15: Coûts relatifs estimés par le modèle désagrégé en fonction de la mesure $E0(\text{coût}\%)$	77
Figure 4-16: Coûts relatifs estimés par le modèle agrégé selon de la fonction de dépassement de coût $E(\text{coût}\%)$	78
Figure 4-17: Coûts relatifs estimés par le modèle désagrégé selon la fonction de dépassement de coût $E(\text{coût}\%)$	78
Figure 5-1: Illustration de la désagrégation des capacités de ressources	88
Figure 5-2: Diagramme de l'approche proactive proposée pour le time-driven RCCP sous incertitude	90
Figure 5-3: Exemple de l'impact de l'introduction d'une réserve de capacité sur le coût	90
Figure 5-4: Diagramme définissant les tailles des réserves de capacité	91
Figure 5-5: Graphe des valeurs moyennes des tailles des réserves de capacités regroupées selon N	95
Figure 5-6: Graphe des valeurs moyennes des tailles des réserves de capacités regroupées selon K	95
Figure 6-1: Exemple illustratif de chemins menant à un lot critique	108
Figure 6-2: Dépassements moyens des jalons en fonction de $L_{\max j}$	110
Figure 6-3: Dépassements moyens des jalons en fonction de $L_{\text{moy}j}$	111
Figure 6-4: Dépassements moyens des dates de début des lots critiques en fonction de nbLotsEnc_j	111
Figure 6-5: Dépassements moyens des jalons en fonction de minMargRes_j	112
Figure 6-6: Dépassements moyens des jalons en fonction de moyMargRes_j	112
Figure 6-7: Dépassements moyens des jalons en fonction de minMargTot_j	113
Figure 6-8: Dépassements moyens des jalons en fonction de moyMargTot_j	113
Figure 6-9: Dépassements moyens des jalons en fonction de minMargSlack_j	114

Figure 6-10: Dépassements moyens des jalons en fonction de moyMargSlack_j	114
Figure 6-11: Influence du nombre de lots sur la fonction de dépassement des jalons	123
Figure 6-12: Influence du nombre de groupes de ressources sur la fonction de dépassement des jalons	123
Figure 6-13: Dépassements moyens de la date d'échéance du projet par méthode pour la classe (N=50, K=3)	129
Figure 6-14: Dépassements moyens de la date d'échéance du projet par approche pour la classe (N=50, K=20)	130
Figure 6-15: Dépassements moyens de la date d'échéance du projet par approche pour la classe (N=10, K=20)	130
Figure 6-16: Dépassements moyens des dates de début des LC par approche pour la classe (N=50, K=3)	132
Figure 6-17: Dépassements moyens des dates de début des LC par approche pour la classe (N=50, K=20)	133
Figure 6-18: Dépassements moyens des dates de début des LC par approche pour la classe (N=10, K=20)	133

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AACE	Association for the Advancement of Cost Engineering
AIA	American Institute of Architects
ALAP	Adaptative search LAP
CIOB	Chartered Institute Of Building
CPM	Critical path method
EPC	Engineering, Procurement, and Construction
EPCM	Engineering, Procurement, and Construction Management
ET	Écart Type
ETO	Engineering-To-Order
FEL	Front-End Loading
FRCPSP	Flexible Resource Constrained Project Scheduling Problem
GPRs	Generalized Precedence Relationships
IAC	Ingénierie, Approvisionnement et Construction
IAGC	Ingénierie, Approvisionnement et Gestion de la Construction
IPA	Independent Project Analysis
ICPA	Incremental Capacity Planning Algorithm
LC	Lot Critique
LPA	Largest Activity Part
MTO	Manufactor-To-Order
PDM	Precedence Diagram Method
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PLM	Programme Linéaire Mixte

RCCP	Rough-Cut Capacity Planning
RCPSP	Resource Constrained Project Scheduling Problem
RCPSVP	RCPSP with Variable intensity activities
RFDFP	Resource Flow Dependent Float Factor
RFN	Resource Flow Network
RI	Real Instances
RGI	Randomly Generated Instances
SPH	Shadow price heuristic
STC	Starting Time Criticality
VADE	Virtual Activity Duration Extension
WBS	Work Breakdown Structure

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – NOMENCLATURE DES VARIABLES ET PARAMÈTRES INTRODUITS DANS L’ALGORITHME DE SIMULATION.....	159
ANNEXE B – ALGORITHME DE SIMULATION ENTRE DEUX POINTS DE DÉCISION SUCCESSIFS.....	160

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les grands projets d'ingénierie et de construction sont hautement complexes. Ils sont en effet caractérisés par des travaux de construction de grande envergure, un nombre important de parties prenantes et d'interfaces, des systèmes compliqués, un manque de standardisation ainsi qu'un degré élevé d'interdépendance [An et Shuai, 2011; Russell, 2013]. Ils sont généralement décomposés en trois grandes phases : la pré-exécution communément appelée *Front-End-Loading*, l'exécution qui comprend les phases d'ingénierie détaillée, d'approvisionnement et de construction et finalement la mise en service et démarrage de projet.

Ces projets sont également caractérisés par un degré élevé d'incertitude. L'incertitude et la complexité sont étroitement liées, chacune contribuant à l'autre en influençant la capacité d'accomplir les tâches de manière efficace et efficiente [Horman et Kenley, 1998]. L'incertitude est encore plus importante durant la phase de pré-exécution et les premières étapes de la phase d'exécution à cause de l'inachèvement des travaux d'ingénierie et l'incertitude importante liée au marché, changements et influences externes des autres parties prenantes du projet en particulier concernant les travaux éloignés dans l'horizon de temps du projet.

Afin de faire face à ces éléments, les grands projets sont généralement planifiés de façon hiérarchique. Des échéanciers agrégés sont ainsi développés pour un large horizon tandis que des échéanciers détaillés sont développés pour le court terme. Les échéanciers deviennent détaillés quand l'horizon de planification passe de l'ensemble du projet aux étapes et phases de projet, une fois les hypothèses testées et les informations précisées [De Leon, 2011].

Dans la littérature scientifique, on propose des modèles mathématiques associés au problème *Rough-Cut Capacity Planning* (RCCP) pour la génération d'échéanciers agrégés au niveau tactique. Les activités détaillées n'y sont pas différenciées, mais font partie de plus gros ensembles appelés lots de travaux et les capacités de ressources y sont estimées grossièrement sur des périodes agrégées. Le niveau tactique réfère ici à la phase d'appel d'offres et d'acceptation d'un projet [De Boer, 1998], correspondant à la dernière étape de pré-exécution. Dans cette thèse, vu que nous nous intéressons aux grands projets, le niveau de planification tactique est étendu aux premières phases d'exécution alors que les travaux d'ingénierie sont toujours en cours. L'objectif principal de la planification au niveau tactique est d'établir des engagements de budget et de dates jalons avec les parties prenantes du projet, notamment le client. Elle n'a pas pour but

de développer des calendriers de travail. Pour générer des échéanciers détaillés à court terme, des techniques d'ordonnancement détaillé associées au problème *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) sont proposées dans la littérature.

Cependant, même si l'incertitude est très présente au niveau tactique, la plupart des méthodes utilisées en pratique pour le niveau de planification tactique sont des méthodes d'ordonnancement déterministe simples incorporées dans des logiciels commerciaux, sans protection contre l'incertitude ni garantie de la qualité de la solution proposée. Il existe toutefois la possibilité de conduire des analyses de risques en se basant sur des techniques comme la simulation Monte Carlo [Herroelen, 2005]. Les outils et techniques souvent utilisées sont PDM (*Precedence Diagram Method*), PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) ou le diagramme de *Gantt* [AACE International, 2010a; Sunke, 2009]. Afin de compenser l'incertitude présente durant la phase de planification, les gestionnaires ont une tendance naturelle à ajouter des tampons de temps aux durées des lots de travaux afin d'absorber les variations potentielles futures [Russell, 2013]. Les gestionnaires ont également tendance à ajouter des tampons de temps entre les dates promises de réception des équipements majeurs et les dates « requis au chantier » pour le début des travaux subséquents sur le chantier [Yeo et Ning, 2006]. Cependant, l'estimation des durées de ces tampons de temps est souvent subjective et uniquement basée sur le jugement du planificateur. Afin de fournir également des estimations budgétaires plus réalistes, les planificateurs ont tendance à ajouter des contingences de coût en se basant sur leur expérience précédente dans des projets similaires [Touran, 2003].

L'absence de méthodes plus objectives et rigoureuses pour l'estimation des contingences de coût et de temps est problématique à plusieurs égards. La qualité des plans produits dépend ainsi en grande partie de l'expérience des planificateurs. Il ne faut donc pas se surprendre que les retards et les dépassements de coûts dans les grands projets d'ingénierie et de construction sont très fréquents [Derakhshanlavijeh et Teixeira, 2016; Duy Nguyen et al., 2004; Jergeas et Ruwanpura, 2009; Kaliba et al., 2009; Rankin et al., 2008]. Baloi et Price [2003] précisent que la faible performance en termes de coûts des projets de construction est devenue la norme et non l'exception. La plupart des approches de planification tactique proposées dans la littérature scientifique ne tiennent pas non plus compte explicitement de l'incertitude, en particulier l'incertitude liée à l'agrégation des données. La désagrégation des données agrégées en données

plus détaillées en passant aux niveaux inférieurs de la hiérarchie de planification peut en effet conduire à des dépassements importants de coûts et durées si la planification n'est pas proactive.

Reconnaissant ces défis, cette thèse a pour objectif de proposer des approches de planification tactique adaptées au contexte des grands projets d'ingénierie et de construction qui intègrent l'incertitude de façon proactive dans les modèles de planification. Les incertitudes considérées comprennent l'incertitude liée à l'agrégation des estimations de capacités de ressources sur des périodes étendues ainsi que l'incertitude dans l'estimation des charges de travail requises des lots de travaux. Cette thèse s'articule ainsi autour de sept chapitres.

Le Chapitre 2 introduit le contexte des grands projets d'ingénierie et de construction qui constituent le cadre de notre étude et décrit la structure de planification hiérarchique utilisée en pratique. Ce chapitre présente également une revue critique de la littérature traitant des approches de planification tactique et plus globalement les approches de planification hiérarchiques, ainsi que les approches d'ordonnancement dans un contexte incertain. Le Chapitre 3 présente les objectifs et les hypothèses de recherche, la démarche scientifique de cette thèse ainsi que le cadre expérimental qui servira à tester les modèles développés dans un contexte incertain qui se rapproche le plus possible de la réalité.

Les modèles développés dans cette thèse sont présentés dans les trois chapitres suivants. Le Chapitre 4 propose un modèle RCCP qui se distingue de la littérature à travers l'intégration de plusieurs niveaux d'agrégation des périodes afin d'adapter le niveau d'effort de planification au niveau de détail et d'exactitude des informations disponibles. Deux variantes sont proposées, l'une a pour objectif de minimiser le coût d'utilisation des ressources non régulières (*time-driven* RCCP) et l'autre minimise la durée du projet (*resource-driven* RCCP). Ce modèle est déterministe et sert de base pour le développement d'approches proactives dans les chapitres ultérieurs.

Le Chapitre 5 propose une approche de planification proactive pour résoudre la variante *time-driven* du problème RCCP sous incertitude en se basant sur une technique d'introduction de réserves de capacités afin de protéger le coût du projet des variations anticipées. Le Chapitre 6 propose quant à lui plusieurs approches de planification proactive destinées à la variante

resource-driven du problème RCCP sous incertitude. Ces approches permettent d'anticiper les perturbations pouvant affecter les dates contractuelles importantes.

Finalement, le Chapitre 7 présente une synthèse générale des travaux, les contributions scientifiques de la thèse et introduit les perspectives de recherche.

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue des approches de planification des projets d'ingénierie et de construction utilisées en pratique ainsi qu'une revue de la littérature scientifique traitant le problème de planification hiérarchique de projets, et plus particulièrement le niveau de planification tactique. Nous concluons ce chapitre par une analyse critique de la littérature qui nous permet de dégager les limitations des approches actuelles de planification tactique ainsi que les opportunités de recherche qui vont être traitées dans la suite de la thèse.

2.1 Contexte des grands projets d'ingénierie et de construction

Les projets d'ingénierie et de construction sont généralement composés de trois grandes phases : pré-exécution, exécution et mise en service et démarrage de projet. La phase de pré-exécution possède différentes appellations selon les industries et les pratiques régionales : *Front-End Loading* (FEL), *Pre-Project Planning*, *Front-End Planning*, *Front-End Development*, *Feasibility Analysis* et *Conceptual Planning*. *Independent Project Analysis* (IPA) définit le *Front-End Loading*, terme le plus souvent utilisé dans l'industrie, comme étant le processus qui permet à la compagnie de développer une définition détaillée d'un projet initié pour atteindre ses objectifs d'affaires. Durant le FEL, on répond aux questions pourquoi, quoi, quand, comment, où et qui d'un projet [Van der Weijde, 2008]. Cette phase de développement est souvent constituée de 3 ou 4 sous-phases séquentielles : FEL0, FEL1, FEL2 et FEL3. À la fin de chaque sous-phase, la décision de poursuivre ou non le projet est prise. De plus, le mandat de chaque sous-phase peut être octroyé à une entreprise différente [George et al., 2012; Gibson Jr et al., 1995; Spangler, 2005].

L'objectif des premières étapes FEL0-1 est la validation des opportunités d'affaires en analysant la viabilité initiale du projet et son importance stratégique. En général, le client est responsable du FEL0 ou les premières étapes du FEL1 (selon le nombre de phases FEL utilisées). Le but du FEL2 est de poursuivre le développement du projet en choisissant le meilleur moyen d'atteindre ses objectifs. Plusieurs alternatives de technologie, processus et commercialisation sont identifiées et évaluées, mais une seule alternative est sélectionnée à la fin de cette étape. Ensuite, la troisième étape FEL3 définit l'alternative sélectionnée de façon suffisamment détaillée pour aider à la décision finale d'investissement du client. Un ensemble de documents d'ingénierie est

développé ou approfondi. L'analyse des risques est terminée, les équipements à longs délais de livraison sont commandés et le plan d'exécution du projet est finalisé. Durant le FEL3 a lieu également le processus d'appel d'offre, de soumission et de sélection du contractant principal qui va réaliser ou gérer le projet.

Après ces phases de développement, la grande phase d'exécution est menée à bien. Elle est constituée de trois phases principales : ingénierie détaillée, approvisionnement et construction. Dans les grands projets de construction, la phase d'exécution est souvent conduite en régime accéléré (« *fast-tracking* ») à travers le chevauchement des phases d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction [Berthaut et al., 2014]. Cette stratégie est répandue en pratique vu la grande taille de ces projets, la demande économique sans cesse croissante de réduire les durées des projets et la volonté d'assurer un retour sur investissement plus rapide. Cependant, cette pratique tend à exacerber la complexité des projets.

Finalement vient la phase de mise en service et démarrage qui constitue l'étape de fermeture du projet. Le but de cette phase est de faire passer l'ensemble des équipements, systèmes et installations du statut « achèvement mécanique » au statut « exploitation commerciale ». Un ensemble d'essais et de tests pré-opérationnels et opérationnels y sont conduits.

Les phases d'exécution et de mise en service et démarrage peuvent être conduites selon différents modes de réalisation. Ces modes dictent le rôle des parties prenantes et les conditions dans lesquelles elles opèrent. Le mode de réalisation de projet peut être défini comme étant la méthode sélectionnée pour partager les responsabilités, risques et gains entre les parties prenantes accomplissant l'ingénierie, la préparation des documents de la construction, la construction et la gestion du projet de construction [The American Institute of Architects, 1996]. Les deux modes de réalisation les plus utilisés sont Ingénierie, Approvisionnement et Construction (IAC) et Ingénierie, Approvisionnement et Gestion de la Construction (IAGC).

Le mode IAC (*EPC* en anglais) consiste à engager une seule firme responsable de l'accomplissement des services d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction nécessaires pour le projet [Touran, 2009]. Cette firme peut sous-traiter la construction à d'autres entrepreneurs. Ce mode est également appelé clé en main, notamment quand la phase de mise en service et démarrage de projet fait partie du contrat. Dans ce type de mandat, le contractant IAC

endosse la majorité du risque du projet. En effet, une fois le contrat signé, la responsabilité du contractant IAC commence et celle du client finit. Toute économie ou augmentation de coût altère positivement ou négativement la marge de profit du contractant IAC. Il est également amené à respecter la date de fin communiquée au client, sinon des pénalités s'appliquent.

Cependant, vu l'augmentation de la taille et complexité des projets d'ingénierie et de construction, il devient de plus en plus difficile de trouver des sous-traitants possédant la compétence, l'expérience et les ressources requises pour entreprendre et assumer tous les risques des grands projets d'investissement en croissance permanente [Loots et Henchie, 2007]. Il y a donc eu une augmentation dans l'utilisation des contrats à prix remboursables et une considérable augmentation dans l'utilisation des contrats IAGC [Loots et Henchie, 2007]. Le mode de réalisation IAGC (EPCM en anglais) est un contrat à prix remboursables qui consiste à engager une firme responsable des services d'ingénierie, d'approvisionnement et de gestion et administration des contrats de la construction. Cette firme peut parfois être amenée à gérer aussi la phase de mise en service et démarrage de projet. Elle ne réalise pas la construction elle-même, mais ce sont des entrepreneurs tiers qui le font. Le contractant IAGC agit à titre d'agent du client et gère le projet au nom du client. Il crée des relations contractuelles directes entre ce dernier et les entrepreneurs et fournisseurs. Chaque contrat commercial est un contrat signé directement entre le client et un entrepreneur ou prestataire de services spécialisés ou fournisseur. Les problèmes qui peuvent survenir dans les contrats signés entre le client et les entrepreneurs ou fournisseurs sont l'ultime responsabilité du client. Sachant que le contractant IAGC doit assister le client dans la gestion et résolution des réclamations, il n'est pas partie prenante d'aucun différent entre les entrepreneurs/fournisseurs avec le client [Loots et Henchie, 2007]. Dans ce type de contrat, le fardeau des risques repose principalement sur le client. Le contractant IAGC est toutefois responsable de toute négligence ou manquement dans les points suivants [Loots et Henchie, 2007]:

- La performance du travail d'ingénierie ;
- L'estimation du budget et le contrôle des coûts ;
- L'estimation et le suivi de la durée du travail ;

- La gestion de l'approvisionnement, l'administration et l'exécution des contrats commerciaux ; et
- La coordination de l'ingénierie et la construction entre les entrepreneurs.

Le mode de réalisation IAGC a donc permis de diminuer le fardeau des risques reposant sur les contractants IAC, mais a augmenté la complexité des projets à cause du nombre important des parties prenantes impliquées et la multitude d'interfaces. Le nombre important d'interfaces réduit la flexibilité de négociation et la responsabilité des différentes parties et peut provoquer plusieurs malentendus, même créer la confusion [Berezina, 2012; Ustinovichius et al., 2008; von Branconi et Loch, 2004].

2.2 Planification des grands projets d'ingénierie et de construction

Les grands projets d'ingénierie et de construction sont planifiés de façon hiérarchique en adoptant une approche d'élaboration progressive des échéanciers tout au long du cycle de vie du projet. Cette approche permet de réduire la complexité du problème de planification en le décomposant en sous-problèmes moins complexes et plus faciles à gérer, sur plusieurs niveaux d'agrégation compatibles avec la phase de projet en cours et l'objectif visé de l'échéancier. Ainsi, des échéanciers à haut niveau basés sur des informations limitées sont développés durant les premières phases de projet tandis que des échéanciers plus détaillés sont développés au fur et à mesure que l'ingénierie avance et que les informations se précisent. Cette élaboration progressive est assurée à travers l'utilisation des classes d'échéanciers. AACE International [2010a] a défini, à partir d'un benchmarking des pratiques généralement acceptées dans l'industrie, un total de cinq classes d'échéanciers de projets bien que 3 à 5 classes sont communément utilisées. L'AACE définit les classes d'échéanciers selon le degré de définition du projet, correspondant approximativement au pourcentage réalisé en ingénierie. Le degré de définition utilisé pour la classification des échéanciers correspond aux phases typiques de développement et d'exécution [AACE International, 2010a].

La Figure 2-1 représente les principales phases d'un projet d'ingénierie et de construction ainsi que les phases de production des classes d'échéanciers. L'échéancier de classe 5 est basé sur le plus faible degré de définition du projet. Cet échéancier est développé par le client au FEL0 ou

FEL1 pour répondre aux objectifs d'évaluation stratégique de la phase. Il est présenté sous la forme d'un diagramme de Gantt (sans relations de précédence) ou d'un tableau dans lequel une barre horizontale est associée à chaque étape majeure, incluant les jalons importants du projet. L'échéancier de classe 4 est développé durant les phases FEL1 et FEL2 pour appuyer les études de faisabilité. Il est plus détaillé que celui de la classe 5 et représente les livrables de haut niveau de chaque phase en se basant sur un organigramme technique (*Work Breakdown Structure - WBS*) préliminaire. Cet échéancier permet une meilleure compréhension de la chronologie des événements clés. L'échéancier de classe 3, développé au cours du FEL3, est généralement préparé pour appuyer les demandes de financement pour l'exécution du projet. Cet échéancier tient généralement compte des contraintes de ressources et des contraintes de précédence. Le niveau de détail doit correspondre au moins à celui du niveau des lots de travaux par type de processus/unité. Il représente l'échéancier de projet jusqu'à ce qu'il soit remplacé par des échéanciers plus détaillés. L'échéancier de classe 2 est développé durant la phase d'exécution et représente l'échéancier de référence détaillé qui remplace l'échéancier de la classe précédente pour le contrôle des dates et ressources. Cet échéancier tient compte des contraintes de ressources et des contraintes de précédence. Le niveau de détail doit refléter les livrables requis par contrat pour chaque lot de travail. Enfin, l'échéancier de classe 1 indique une définition et maturité complète du projet. Il est préparé pour une partie du projet et non pour le projet en entier. Il tient compte des contraintes de ressources et de précédence et est considéré comme un calendrier de production qui définit le travail requis par jour ou par semaine.

Les techniques utilisées pour les échéanciers des classes 3, 2 et 1 comprennent la méthode du chemin critique (CPM) et la méthode PERT. CPM est une méthode qui permet d'estimer la durée minimum du projet correspondant à la longueur du plus long chemin appelé chemin critique. Elle permet aussi de calculer le degré de flexibilité dans les dates de début des activités sans impacter la durée du projet [Project Management Institute, 2013]. Les durées des activités sont déterministes et les ressources sont supposées illimitées. La méthode d'évaluation PERT est basée sur la méthode CPM, mais considère les durées des activités probabilistes avec une valeur optimiste, une valeur pessimiste et une valeur la plus probable. Son but est d'évaluer la probabilité que le projet se termine à l'intérieur d'un délai donné [Cottrell, 1999].

Le Tableau 2-1 résume les principales caractéristiques des différentes classes d'échéancier. Il est à noter que l'usage d'un échéancier est relatif à l'identité de la partie intéressée. Une classe d'échéancier peut être utilisée par le client pour soutenir le financement du projet, comme elle peut être utilisée par un contractant pour appuyer une soumission de contrat ou un appel d'offres. En plus des classes d'échéanciers, AACE International [2010b] définit les niveaux d'échéanciers à partir des pratiques communes dans l'industrie de construction. Ces niveaux correspondent au niveau de détail requis pour la communication. Ainsi, un échéancier d'une classe donnée peut être présenté avec différents niveaux d'agrégation selon l'audience visée par le plan.

Cependant, proposer la même classe d'échéancier pour toute la phase d'exécution est peu réaliste dans le contexte des grands projets d'ingénierie et de construction. Ces projets sont en effet caractérisés par une grande envergure des travaux et sont souvent exécutés en mode accéléré comme le montre la Figure 2-1. L'ingénierie est progressivement détaillée afin de pouvoir commencer les travaux d'approvisionnement et de construction subséquents. D'où le besoin d'une structure d'échéanciers spécifique au contexte des grands projets d'ingénierie et de construction pour adresser cette évolution progressive dans la définition du projet à mesure que nous avançons dans la phase d'exécution.

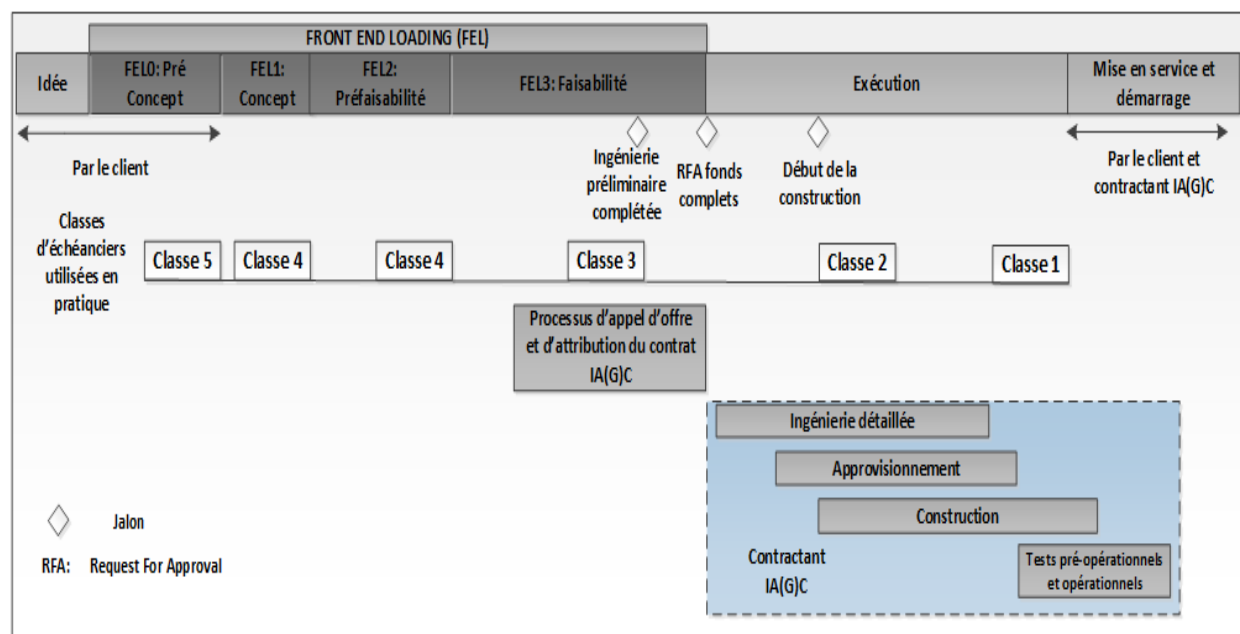


Figure 2-1: Phases et classes d'échéanciers dans un projet IA(G)C

Tableau 2-1: Matrice générique de classification des échéanciers, adaptée de [AACE International, 2010a]

Classe d'échéancier	Degré de définition du projet (en % de la définition complète)	Utilisation finale	Méthode de planification utilisée
Classe 5	0% à 2%	Sélection de concept	Planification descendante
Classe 4	1% à 15%	Étude de faisabilité	Planification descendante. Semi détaillée.
Classe 3	10% à 40%	Budget, autorisation ou contrôle	Planification descendante. Semi détaillée.
Classe 2	30% à 70%	Contrôle ou soumission/appel d'offre	Planification ascendante. Détaillée.
Classe 1	70% à 100%	Contrôle ou soumission/appel d'offres	Planification ascendante. Détaillée.

2.3 Revue de littérature scientifique des modèles et méthodes de planification proposés pour les différents niveaux hiérarchiques de planification

2.3.1 Structure de planification hiérarchique proposée en littérature scientifique

De Boer [1998] a proposé une structure hiérarchique pour les organisations (semi) pilotées par les projets. En se basant sur la typologie de planification d'Anthony [1965], il distingue quatre niveaux de planification : stratégique, tactique, tactique/opérationnel et opérationnel. Cette structure est présentée dans la Figure 2-2 avec les problèmes de planification associés à chaque niveau. Plusieurs auteurs ont repris cette structure incluant Hans [2001], Hans et al. [2007], Leus [2003] et Masmoudi [2011].

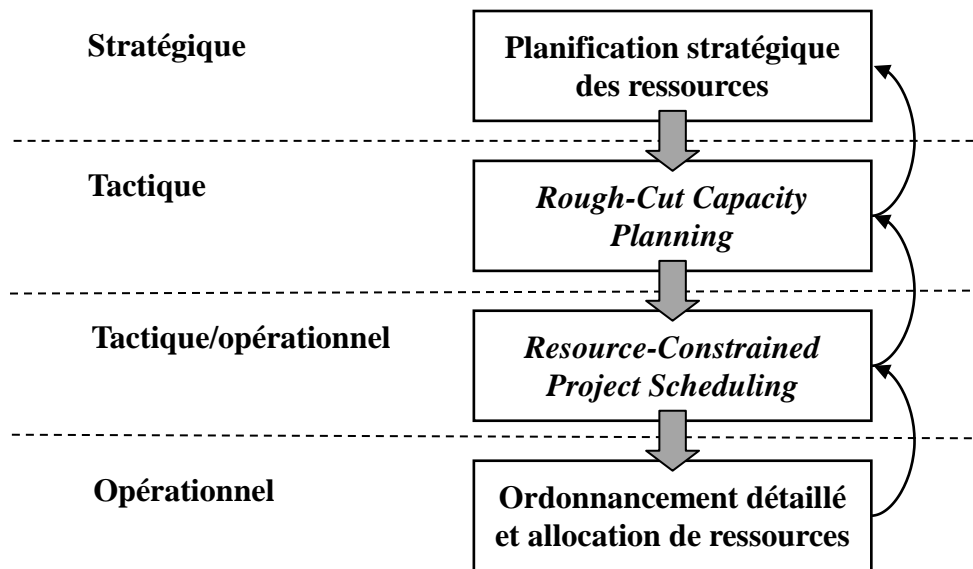


Figure 2-2: Structure de planification hiérarchique proposée par De Boer [1998]

Le niveau stratégique est basé sur une prévision de la demande en projets. Il adresse les décisions stratégiques comme la détermination de la capacité globale de l'entreprise en ressources critiques. La planification stratégique relève de la responsabilité de la haute direction, contrairement aux niveaux tactique et opérationnel qui relèvent de la responsabilité des gestionnaires de projet. De Boer suggère pour ce niveau un horizon de planification pouvant varier d'une à plusieurs années.

Les autres niveaux de planification correspondent chacun à une phase de projet. De Boer [1998] subdivise le cycle de vie d'un projet en phases suivantes : acceptation de projet, ingénierie et planification de processus, ordonnancement de ressources et de matériel, exécution de projet et finalement évaluation et service. Le problème RCCP (*Rough-Cut Capacity Planning*) est associé à la phase d'acceptation de projet. Sa résolution permet d'établir des engagements de budget et de dates jalons avec les parties prenantes du projet, notamment le client. De Boer suggère pour ce niveau un horizon de planification de six mois ou plus selon la durée prévue du projet. On planifie l'exécution des lots de travaux qui consistent en un regroupement de plusieurs activités sur un horizon de temps discrétisé en périodes. Les lots sont définis par des charges de travail au lieu de durées prédéfinies et leur consommation de ressources peut varier d'une période à l'autre. La charge de travail d'un lot correspond à ses exigences totales en ressources en termes d'unités

ressources-temps [Fündeling et Trautmann, 2010]. Les charges ainsi que les capacités des ressources par période sont estimées grossièrement selon le degré atteint de définition de projet.

Le problème RCPSP (*Resource-Constrained Project Scheduling Problem*) est associé à la phase d'ordonnancement en se basant sur les informations plus détaillées sur les capacités et exigences en ressources obtenues à l'issue de la phase d'ingénierie et de planification des processus. Les lots de travaux sont décomposés en activités plus détaillées avec des durées et des taux d'utilisation de ressources constants [De Boer, 1998]. L'objectif de la phase d'ordonnancement est la définition des dates de début et de fin de chaque activité. L'horizon de planification suggéré est de quelques semaines à quelques mois.

Finalement, l'ordonnancement détaillé au niveau opérationnel est réalisé durant la phase d'exécution afin d'assigner les personnes (par nom) et les matériaux/machines (par code) aux différentes activités. En effet, le plan issu de la résolution du RCPSP au niveau supérieur indique quand les activités requièrent certains groupes de ressources, mais ne précise pas quelles sont les unités de ce groupe qui seront assignées à chaque activité. L'horizon de planification du niveau opérationnel varie d'une à quelques semaines.

Cependant, le cycle de vie de projet proposé par De Boer [1998] ne correspond pas aux phases des grands projets d'ingénierie et de construction comme illustrées dans la Figure 2-1. Nous proposons donc d'adapter sa structure de planification hiérarchique au contexte des grands projets d'ingénierie et de construction comme le montre le Tableau 2-2.

La planification durant les premières phases de développement (FEL 0-1-2) n'est pas incluse dans le tableau, car les échéanciers qui y sont développés sont basés sur des informations très limitées et sont par conséquent très sommaires, ont une marge de précision étendue et ne sont pas basés sur les ressources. Il est à noter cependant qu'à la fin de chacune de ces étapes FEL, un échéancier détaillé est développé pour la prochaine étape FEL. À partir de l'étape FEL 3 correspondant à la dernière étape de développement précédant le début d'exécution du projet, les échéanciers sont basés sur les ressources et considèrent les relations de précédence entre les entités planifiées. Durant le FEL 3, l'ingénierie préliminaire est menée afin de définir l'étendue du projet à un degré suffisamment détaillé pour appuyer la décision finale d'investissement. Nous proposons de résoudre le problème RCCP à cette étape afin de générer un échéancier tactique qui

permettra de définir les dates jalons et dates d'échéance ainsi que le coût de projet (ou phases de projet). Ces éléments deviennent des contraintes pour les niveaux inférieurs dans la hiérarchie de planification. On note que les termes 'phase' et 'étape' sont utilisés de façon interchangeable dans le texte et réfèrent aux portions du projet produisant des livrables à haut niveau. Au niveau tactique/opérationnel, nous proposons de résoudre le problème RCPSP comme suggéré par De Boer [1998] dans le but de générer des échéanciers plus détaillés pour la prochaine étape de projet ou les prochains mois. Finalement, au niveau opérationnel, les unités de ressources sont affectées aux activités pour la(les) semaine(s) à venir. Aux trois niveaux de planification, les plans doivent être mis à jour de façon périodique soit pour avancer l'horizon de planification ou bien pour tenir compte des informations plus précises qui deviennent progressivement disponibles. L'intervalle de périodicité est défini par les gestionnaires et est logiquement plus petit à mesure que nous descendons dans la structure hiérarchique de planification. Cependant, les échéanciers des différents niveaux doivent également être mis à jour à chaque fois qu'une nouvelle information apparaît qui pourrait affecter la validité des outputs de l'échéancier.

Le RCCP est le problème de planification souvent associé au niveau tactique et le RCPSP au niveau tactique/opérationnel. Pour simplifier, nous allons référer au niveau tactique/opérationnel par le niveau opérationnel comme c'est souvent le cas dans la littérature. Dans la prochaine section, nous allons présenter une revue détaillée des modèles RCCP proposés pour le niveau tactique, le niveau de planification qui nous intéresse dans cette thèse. Ensuite, nous allons présenter dans la section 2.3.3 une revue de littérature sommaire des modèles RCPSP proposés pour le niveau opérationnel et souligner les différences entre les problèmes RCPSP et RCCP. Cependant, il est à noter que d'autres approches de planification ont été proposées pour les différents niveaux hiérarchiques. Citons à titre d'exemple Sunke [2009] qui propose de résoudre au niveau tactique des projets de construction le problème d'ordonnancement de projet sans intégration de la planification de la capacité avec la planification du temps à travers des méthodes traditionnelles CPM ou PERT. Speranza et Vercellis [1993] proposent un modèle tactique pour le contexte multi-projets basé sur l'hypothèse multimode. Chaque projet correspond à une activité agrégée à laquelle sont associés plusieurs modes de fonctionnement possibles. Le problème consiste à choisir un mode et une date de début pour chaque projet, de façon à maximiser la valeur actuelle nette totale. Pour leur part, Dey et al. [1996] proposent un modèle de planification

hiérarchique à trois niveaux pour un projet de construction : niveau du projet, niveau du lot de travail et niveau de l'activité. Il est résolu à l'aide de la programmation par objectifs. À chaque niveau est associé un modèle linéaire composé de contraintes technologiques et de contraintes supplémentaires. Les contraintes supplémentaires assurent que le niveau de réalisation d'un objectif soit égal au niveau d'aspiration établi par les gestionnaires par rapport à cet objectif. La fonction-objectif consiste à minimiser les variables d'écart des contraintes supplémentaires.

Tableau 2-2: Structure de planification hiérarchique pour les grands projets d'ingénierie et de construction

Niveau de planification	Problème de planification	Espace de décision	Fréquence de planification	Phase de projet
Tactique	<i>Rough-Cut Capacity Planning</i>	L'ensemble du projet	Périodiquement ou à l'apparition de nouveaux faits pouvant impacter les jalons/dates d'échéance établis ou le coût de projet	FEL3 – Ingénierie détaillée
Tactique/opérationnel	<i>Resource-Constrained Project Scheduling</i>	Prochaine étape du projet ou livrables à court terme	Périodiquement ou à l'apparition de nouveaux faits pouvant impacter les dates de début et de fin des activités	FEL3 – Grandes phases d'exécution et de mise en service
Opérationnel	Ordonnancement détaillé	Semaine(s) subséquentes	Périodiquement	FEL3 – Grandes phases d'exécution et de mise en service

2.3.2 Le problème RCCP « Rough-Cut Capacity Planning » associé au niveau tactique

Comme décrit précédemment, la résolution du problème RCCP permet de planifier les lots de travaux et d'estimer de façon agrégée l'utilisation des ressources afin de pouvoir déterminer les dates jalon et d'échéance et estimer le coût de projet. Deux types de problèmes RCCP peuvent être distingués : le *Resource-driven* RCCP et le *Time-driven* RCCP. Le premier considère les contraintes de ressources rigides et son but est de minimiser la durée du projet ou minimiser les retards par rapport aux dates d'échéance considérées flexibles, tandis que le deuxième problème autorise l'augmentation des capacités régulières par des capacités non régulières plus coûteuses. L'objectif de ce deuxième problème est de minimiser le coût de la capacité non régulière tout en respectant les dates d'échéances considérées fermes dans ce cas.

Dans cette section, nous allons faire une revue des principaux modèles RCCP proposés dans la littérature ainsi qu'une classification des méthodes de résolution de ces modèles. Nous incluons dans notre revue les modèles pertinents destinés au problème *Resource Loading* qui représente l'équivalent du problème RCCP dans un environnement *Engineering-To-Order* (ETO) ou *Manufacturer-To-Order* (MTO) [Hans, 2001; Wullink, 2005]. En effet, les systèmes de production MTO et ETO visent la production d'articles complexes et conçus sur mesure pour les besoins du client [Alfieri et al., 2011]. Ils comportent également des phases d'appel d'offres, d'ingénierie et de planification de processus en plus des phases de production, d'assemblage et d'installation [Carvalho et al., 2015]. Ils sont ainsi modélisés comme des projets. Nous incluons également dans notre revue quelques modèles d'ordonnancement RCPSP normalement proposés pour le niveau opérationnel, mais qui peuvent être adaptés au niveau tactique puisqu'ils ne considèrent pas les durées des activités prédéfinies et permettent de varier leur consommation de ressources d'une période à l'autre. Les durées des périodes doivent toutefois être adaptées en conséquence et les lots de travaux considérés au lieu des activités détaillées. Ces modèles sont dénommés RCPSVP (RCPSP *with variable intensity activities*) ou FRCPSP (RCPSP *with flexible resource profiles*).

2.3.2.1 Formulations existantes

Contrairement au RCPSP qui a été largement traité dans la littérature, la littérature sur le RCCP est très restreinte. Le problème RCCP est prouvé être un problème NP-difficile au sens fort par Kis [2005]. En particulier, les contraintes de précédence rendent le problème RCCP un problème d'optimisation combinatoire complexe. Gademann et Schutten [2005] ont proposé un modèle linéaire basé sur l'approche *Time-Driven* RCCP. Afin d'alléger le problème et le rendre plus facile à résoudre, les auteurs remplacent les contraintes de précédence entre les lots par des fenêtres de temps où les lots peuvent être exécutés sans violer les relations de précédence. Hans [2001] propose un modèle linéaire (programme linéaire mixte, PLM) combinant les approches *Time-Driven Planning* et *Resource-Driven Planning* du RCCP. Le modèle est basé sur le concept de plan de projet qui spécifie pour chaque lot de travail les périodes pendant lesquelles il peut être exécuté. Le calendrier de projet détermine par la suite la portion du lot qui sera exécutée sur chacune de ces périodes. Seuls les plans de projets faisables par rapport aux relations de précédence et fenêtres de temps des lots sont considérés. L'auteur tient compte des relations de précédence de façon implicite en interdisant à deux lots reliés par une relation de précédence d'être exécutés sur la même période, ou bien en autorisant que la dernière période d'un lot coïncide avec la première période de son successeur, sans garantir leur succession dans le temps. Dans ce cas, afin de réduire les risques d'infaisabilité, l'auteur propose de limiter le nombre de lots pouvant s'exécuter sur une même période. Kis [2005] propose un modèle RCPSVP dont les hypothèses sont semblables au problème RCCP. Le modèle est un PLM où les lots liés par une relation de précédence directe ne peuvent pas être exécutés dans la même période grâce à l'utilisation de variables binaires. Bianco et Caramia [2013] proposent un modèle semblable à celui de Kis [2005], mais qui considère les intensités des lots cumulatives.

Tous ces modèles traitent les notions de temps au niveau des périodes comme les notions de charge. Ceci engendre une difficulté dans la modélisation des relations de précédence et une complexité de résolution additionnelle. En effet, soit ces modèles sur-contrainent le problème en interdisant aux lots successifs d'être exécutés dans la même période ou risquent des infaisabilités. Aussi, la détermination des périodes où sont exécutés les lots afin d'assurer le respect des relations de précédence repose sur un grand nombre de variables binaires. C'est pourquoi ces auteurs ont proposé des approches de résolution par décomposition ou des heuristiques. Afin de

contourner ces problèmes, Haït et Baydoun [2012] proposent un modèle PLM pour le problème *Time-Driven* RCCP qui combine l'utilisation de variables continues pour la représentation des dates de début et de fin des lots de travaux avec des variables discrètes pour une considération périodique des contraintes de ressources. Les relations de précédence sont ainsi simplement modélisées avec les dates de début et de fin des lots.

Naber et Kolisch [2014] ont proposé plusieurs modèles PLM pour le FRCPSPP en se basant sur des formulations existantes et ont comparé leurs performances. Ils trouvent que la formulation basée sur les modèles de Kis [2005] et Bianco et Caramia [2013] est la plus performante.

2.3.2.2 Extensions au problème RCCP classique

Il existe quelques extensions au problème RCCP classique, à savoir le RCCP avec des relations de précédence généralisées, le RCCP avec chevauchement et retouches ainsi que le RCCP tenant compte de l'incertitude.

Le problème RCCP classique considère des relations de précédence simples de type Fin-Début et néglige le chevauchement. Pourtant, d'autres types de relations de précédence existent en pratique et le chevauchement est une réalité des projets à fort contenu d'ingénierie [Berthaut et al., 2011; Greze et al., 2011]. Kis [2006] a généralisé le modèle RCPSVP de Kis [2005] en introduisant des relations de précédence qu'il nomme *feeding precedence relations*. Ces relations permettent le chevauchement des activités en autorisant une activité à commencer après qu'un certain pourcentage de son prédécesseur soit réalisé. Ce type de relations a été modélisé à travers l'utilisation de variables binaires. Alfieri et al. [2011] généralisent les relations de précédence introduites par Kis [2006] en définissant quatre types de relations de précédence généralisées : *%Completed-to-Start*, *Start-to-%Completed*, *%Completed-to-Finish* et *Finish-to-%Completed*. Le premier type *%Completed-to-Start* correspond aux relations introduites par Kis [2006]. Alfieri et al. [2011] modélisent ces relations de précédence généralisées dans un modèle de planification de la production (*Resource Loading*) équivalent au problème RCCP. Baydoun et al. [2016] proposent un modèle PLM pour le problème *Time-Driven* RCCP qui permet le chevauchement entre les lots de travaux selon différents modes possibles tout en considérant les retouches. Un mode est défini par le pourcentage de la charge du prédécesseur qui doit être accompli avant le début de son successeur ainsi que les quantités de retouches qui en découlent. Les retouches sont

des charges additionnelles pouvant s'ajouter aux charges initiales des lots qui chevauchent à cause des efforts supplémentaires d'échange et de communication et les risques d'erreur et de correction sur le successeur.

Une autre extension importante du problème RCCP classique est la considération de l'incertitude. Bien que l'incertitude soit très présente au niveau tactique, très peu de modèles RCCP en tiennent compte. On cite Wullink et al. [2004] qui étendent le modèle du *Resource Loading* déterministe proposé par Hans [2001] en considérant incertaines les charges de travail d'un certain nombre de lots. Le modèle est basé sur la discrétisation du contenu stochastique du travail. Les auteurs définissent pour chacun des lots incertains trois modes de fonctionnement possibles et des scénarios d'exécution sont établis à partir des combinaisons de ces modes. L'objectif consiste à minimiser le coût de la capacité non régulière en tenant compte des scénarios possibles avec leurs probabilités d'occurrence respectives.

Masmoudi [2011] a également proposé un modèle RCCP tenant compte de l'incertitude des charges de travail. À l'opposé de Wullink et al. [2004], les distributions des charges sont considérées continues. L'auteur utilise la théorie des possibilités basée sur les ensembles flous comme alternative à la théorie des probabilités puisque cette dernière requiert l'existence de données statistiques et ne peut représenter l'incertitude subjective. Les charges de travail sont considérées des nombres flous. L'auteur introduit un indicateur de robustesse qui mesure l'éventualité qu'un plan excède la limite de capacité à travers la comparaison de la charge floue avec la capacité disponible.

Carvalho et al. [2016] proposent un modèle de planification tactique de la capacité pour le contexte ETO basé sur l'optimisation robuste qui modélise les données incertaines en se basant sur des bornes inférieures et supérieures de l'intervalle d'incertitude au lieu de considérer les distributions exactes de probabilité. Leur modèle a pour objectif de maximiser la stabilité des dates de début des activités agrégées en gardant des réserves de capacité dans les trois premières périodes où ils considèrent la capacité fixe. Les réserves de capacité ne sont pas introduites dans les autres périodes où la capacité est considérée flexible. Leur modèle tend ainsi à reporter les charges vers les périodes futures afin de maximiser la stabilité des dates sur les premières périodes.

2.3.2.3 Classification des méthodes de résolution du problème RCCP

Quatre catégories de méthodes sont distinguées dans la littérature pour la résolution du problème RCCP :

- Heuristiques constructives simples ;
- Heuristiques basées sur la programmation linéaire ;
- Métaheuristiques ; et
- Méthodes exactes.

Heuristiques constructives simples :

Cette catégorie comprend des algorithmes approximatifs qui servent à construire une solution réalisable. Ils utilisent généralement une règle de priorité pour planifier les lots ou des parties de lots et ne sont pas basés sur des techniques de programmation mathématique. On y distingue les heuristiques qui construisent une solution en une seule passe et celles qui utilisent plusieurs passes afin d'améliorer la solution obtenue précédemment.

Parmi ceux-ci, Gademann et Schutten [2005] proposent deux heuristiques constructives basiques qui vont générer une solution initiale en une seule passe pour d'autres heuristiques. Elles ne considèrent pas les restrictions sur la disponibilité des ressources.

De Boer [1998] a également développé une heuristique à passe unique, nommée ICPA (*incremental capacity planning algorithm*). Cette heuristique commence par trier les lots de travaux selon un critère d'ordre (p.ex. en ordre non décroissant des dates de fin limites) et les planifie dans cet ordre dans les deux phases de l'algorithme. La première phase essaie autant que possible de planifier chaque lot dans sa fenêtre de temps éligible sans recourir aux ressources supplémentaires. Dans la deuxième phase, le reste des lots ou parties de lots non planifiés sont planifiés en utilisant cette fois la capacité non régulière.

Wullink [2005] propose une autre heuristique constructive à passe unique, LAP (*Largest Activity Part*), mais cette fois sur quatre phases. Dans la première phase, on planifie les activités triviales, c'est-à-dire celles qui ont leur durée minimale égale à leur fenêtre de temps. Durant la phase 2, on planifie les activités en utilisant uniquement la capacité régulière. La phase 3 permet de planifier

les activités partiellement planifiées avec la capacité régulière dans la phase précédente en utilisant la capacité non régulière. Dans la phase 4, le reste du contenu de travail est planifié en utilisant la capacité non régulière. Wullink [2005] étend son heuristique LAP à un algorithme ALAP (*Adaptative search LAP*) qui utilise plusieurs passes, conduisant chacune à une solution différente en sélectionnant les priorités des activités selon un schéma aléatoire. La meilleure solution est sélectionnée après un nombre de passes prédéterminé.

Heuristiques basées sur la programmation linéaire :

Gademann et Schutten [2005] distinguent trois classes de ce type d'heuristiques, la classe 1 consiste en des heuristiques qui se basent sur une solution faisable initiale trouvée par une heuristique constructive. À partir de cette solution initiale, on récupère le plan de projet qui spécifie les périodes dans lesquelles chaque lot peut s'exécuter sans violer les contraintes de précédence. En se basant sur ce plan de projet, le modèle linéaire est résolu pour trouver la répartition optimale des charges de travail correspondante. La classe 2 est constituée d'heuristiques qui résolvent le modèle sans considérer les relations de précédence, puis réparent les solutions infaisables trouvées. La classe 3 est composée d'heuristiques de recherche locale visant l'amélioration d'une solution faisable tout en ayant recours à la résolution du modèle linéaire.

Wullink [2005] propose plusieurs heuristiques dans la classe 1 basées sur les heuristiques constructives LAP et ALAP qu'il a développées. De Boer [1998] propose une heuristique réparatrice appartenant à la classe 2. Le programme linéaire est d'abord résolu sans considérer les relations de précédence. Ensuite, l'heuristique met à jour de façon itérative les fenêtres de temps des lots afin de réparer les relations de précédence violées et puis relance le programme linéaire après chaque réparation jusqu'à ce que toutes les relations de précédence soient respectées. Gademann et Schutten [2005] proposent aussi une heuristique commençant par une solution irréalisable puis la transforment en une solution faisable. Pour ce faire, les auteurs réparent les relations de précédence violées une par une. En se basant sur un critère de sélection, la prochaine relation de précédence, dans l'ordre donné par le critère, est réparée en évaluant toutes les possibilités de réparation de la violation et en choisissant la meilleure.

Gademann et Schutten [2005] proposent une heuristique appartenant à la classe 3, SPH (*Shadow price heuristic*). D'abord une solution initiale est trouvée à l'aide d'une heuristique constructive. L'heuristique fonctionne ensuite par itérations. À chaque itération, le programme linéaire sans relations de précédences est résolu (sachant que les fenêtres de temps de la solution initiale assurent le respect des relations de précedence), puis les coûts marginaux sont utilisés pour estimer les directions des changements possibles des fenêtres de temps de chaque lot. SPH évalue les directions de changement et accepte la première direction qui conduit à une amélioration. L'heuristique se termine quand aucun des changements ne conduit à une amélioration de la solution.

Métaheuristiques :

Cette classe comprend la métaheuristique du recuit simulé proposée par Masmoudi [2011] pour le problème RCCP avec incertitude. L'auteur a eu recours à cette méthode, car son modèle vise à maximiser des indicateurs de robustesse non linéaires qui ne peuvent pas être considérés dans des heuristiques basées sur la programmation linéaire, mais qui sont acceptés dans la méthode du recuit simulé. Une solution initiale faisable est d'abord trouvée à l'aide d'une heuristique constructive simple. Le modèle étant basé sur la formulation de Hans [2001], une solution consiste à définir un plan de projet et un calendrier de projet. La solution initiale est ensuite perturbée en modifiant soit le plan de projet ou le calendrier de projet. Si la fonction-objectif est améliorée, on accepte la nouvelle solution, sinon cette dernière est acceptée avec une probabilité basée sur le facteur de Boltzmann. Ce processus est répété jusqu'à un critère d'arrêt. Cette méthode permet de trouver de bons résultats, mais en demandant plus de temps de calcul lorsque comparée à l'heuristique SPH de Gademann et Schutten [2005].

Méthodes exactes :

Hans [2001] propose une méthode exacte de type Branch & Price pour résoudre son modèle RCCP avec contraintes de ressources implicites. Branch & Price est une combinaison de la méthode Branch & Bound et la méthode de génération de colonnes. Cette méthode est utile pour les grands programmes linéaires en nombres entiers. En effet, le modèle est basé sur la génération de plans de projets faisables dont le nombre croît dramatiquement avec la taille du problème. La

méthode Branch & Price utilisée par l'auteur a l'avantage de générer uniquement les plans de projets qui conduiront à une amélioration de la solution.

Kis [2005] propose une autre méthode de résolution exacte appelée Branch & Cut pour résoudre son modèle RCPSVP. La méthode Branch & Cut est basée sur la génération de coupes à partir d'une étude polyédrique des relations de précédence. Cette méthode est duale à la méthode Branch & Price de Hans [2001] qui est basée sur la génération de colonnes. En effet, les deux modèles diffèrent principalement dans la modélisation des contraintes de précédence. La modélisation de Kis [2005] peut amener à un nombre important de contraintes tandis que celle de Hans [2001] peut générer un nombre important de variables.

Comme expliqué précédemment, traiter les notions de temps au niveau des périodes complexifie le problème. En représentant les dates de début et de fin des lots en temps continu tout en gardant les contraintes des ressources agrégées sur les périodes, Haït et Baydoun [2012] diminuent de la complexité du problème RCCP. Ils résolvent leur modèle à l'aide du solveur CPLEX et trouvent des résultats comparables à ceux de Kis [2005].

Nous résumons dans le Tableau 2-3 les principaux modèles de planification tactique de projets et modèles RCPSVP ou FRCPSP adaptés aux hypothèses du niveau tactique. Les modèles sont classés selon plusieurs attributs. L'acronyme GRRs réfère aux relations de précédence généralisées. L'acronyme RI réfère à des instances de projet réelles et RGI réfère à des instances de projet fictives.

Tableau 2-3: Littérature pertinente pour le problème de planification tactique des projets

Auteurs	Contexte	Type de modèle	Mesure de robustesse	Incertitudes	Fonction-objectif	Capacités	Niveaux d'agrégation	Relations de précédence	Dates Début/Fin	Méthode de résolution	Instances test
Leachman et Boysen [1985]	Multi-projets	Déterministe	-	-	Min. coût actualisé des ressources inutilisées	Rigides	Un seul	Fin-Début	Discret	Exacte	RI
Speranza et Vercellis [1993]	Multi-projets	Déterministe	-	-	Max. valeur actuelle nette	Rigides	Un seul	Fin-Début	Discret	Exacte	RI
De Boer [1998]	Multi-projets	Déterministe	-	-	Min. coût ressources non régulières	Flexibles	Un seul	Fin-Début	Discret	Heuristique	RGI
Hans [2001]	Multi-projets	Déterministe	-	-	Min. coût ressources non régulières	Flexibles	Un seul	Fin-Début	Discret	Exacte + Heuristique	RGI
Neumann et al. [2003]	Multi-projets	Déterministe	-	-	Niveler les ressources Max. valeur actuelle nette	Flexibles	Un seul	GPRs	Discret	Exacte + Heuristique	RGI
Wullink et al. [2004]	ETO	Proactif (stochastique)	Robustesse de la qualité	Charges de travail	Min. espérance du coût ressources non régulières	Flexibles	Un seul	Fin-Début	Discret	Exacte + Heuristique	RGI
Gademann et Schutten [2005]	Multi-projets	Déterministe	-	-	Min. coût ressources non régulières	Flexibles	Un seul	Fin-Début	Discret	Heuristique	RGI
Kis [2005]	Projets	Déterministe	-	-	Min. coût ressources externes	Flexibles	Un seul	Fin-Début	Discret	Exacte	RGI
Kis [2006]	Projets	Déterministe	-	-	Min. coût violation contraintes ressources	Flexibles	Un seul	Feeding	Discret	Exacte	RGI
Masmoudi [2011]	Multi-projets	Proactif (fuzzy/théorie des possibilités)	Robustesse de la qualité	Charges de travail	Min. espérance du coût ressources non régulières Max indicateurs de robustesse flous	Flexibles	Un seul	Fin-Début	Discret	Métaheuristique	RI, RGI
Alfieri et al. [2011]	ETO	Déterministe	-	-	Min. durée de projet	Rigides	Un seul	Feeding	Discret	Exacte	RI, RGI
Alfieri et al. [2012]	ETO	Proactif (stochastique)	Robustesse de la qualité	Charges de travail	Min. espérance du makespan	Rigides	Un seul	Fin-Début	Discret	Exacte	RI, RGI
Haït et Baydoun [2012]	Projets	Déterministe	-	-	Min. coût ressources non régulières	Flexibles	Un seul	Fin-Début	Continu	Exacte	RGI
Naber et Kolisch [2014]	Projets	Déterministe	-	-	Min. durée de projet	Rigides	Un seul	Fin-Début	Discret	Exacte	RGI
Baydoun et al. [2016]	Multi-projets	Déterministe	-	-	Min. combinaison de coût ressources non-régulières et durée de projet	Flexibles	Un seul	Modes de chevauchement avec retouches	Continu	Exacte	RGI
Carvalho et al. [2016]	ETO	Proactif (optimisation robuste)	Robustesse de la solution	Temps de traitement	Min. coût de production	Flexibles	Un seul	Cadence	Discret	Exacte	RI

2.3.3 Le problème RCPSP « *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* » au niveau opérationnel

Le problème RCPSP est destiné à l'ordonnancement des activités détaillées au niveau opérationnel sous l'objectif de minimisation de la durée du projet (ou plutôt phase de projet dans le contexte des grands projets). Contrairement au niveau tactique, l'horizon de temps est court et discrétisé en périodes détaillées. Les capacités de ressources par unité de temps sont donc supposées constantes tout au long de l'horizon. Les capacités de ressources sont généralement considérées non flexibles à l'opposé du niveau tactique où les contraintes de ressources sont plus souples. Le RCPSP exige la connaissance au préalable des durées des activités, leur consommation de ressources par unité de temps, supposée constante, ainsi que les relations de précedence entre les activités détaillées. Ceci est possible vu le degré plus élevé de disponibilité et de précision de données au niveau opérationnel. Le Tableau 2-4 résume les principales différences entre le problème RCCP et RCPSP.

Tableau 2-4: Comparaison entre le problème RCCP et le RCPSP standard

Caractéristique	RCCP	RCPSP
Entités planifiées	Lots de travaux	Activités détaillées
Durées des entités	Durées minimales connues	Durées connues
Exigences de ressources par entité	Charge de travail totale requise en termes d'unités ressources-temps (p.ex. 80 hommes-semaines)	Un nombre de ressources fixe requis par unité de temps (p.ex. 10 hommes)
Taux d'utilisation de ressources des entités	Variable d'une période à l'autre	Constant
Capacités de ressources	Estimations grossières - Flexibles	Profils détaillés - Fermes
Horizon de temps	Discrétisé en périodes agrégées - Long	Discrétisé en périodes détaillées - Court
Fonction-objectif	<i>Time-Driven</i> : Minimiser le coût des ressources non régulières <i>Resource-Driven</i> : Minimiser la durée du projet ou les retards par rapport aux dates d'échéance	Minimiser la durée du projet

Plusieurs extensions au problème RCPSP standard existent. Ces extensions changent certaines hypothèses du modèle standard. Elles regroupent les extensions des concepts d'activités, concepts de ressources, concepts de temps, les alternatives de la fonction-objectif, la considération simultanée de plusieurs projets ainsi que la considération de l'incertitude. Nous allons citer des exemples d'extensions de chacune de ces catégories avec quelques références pertinentes ayant traité du sujet. Quelques extensions du concept d'activités sont l'ordonnancement préemptif qui autorise l'interruption des activités [Ballestín et al., 2008; Demeulemeester et Herroelen, 1996; Vanhoucke et Debels, 2008], le RCPSP multimode qui permet aux activités d'être exécutées selon plusieurs modes différant dans les durées d'exécution et consommation de ressources [Alcaraz et al., 2003; Bouleimen et Lecocq, 2003; Hartmann, 2001] et le RCPSVP cité dans la section 2.3.2 qui autorise la variation de la consommation de ressources des activités d'une période à l'autre. Quelques extensions des concepts de temps sont la généralisation des contraintes de précédence [Bartusch et al., 1988; De Reyck et Herroelen, 1998] et l'autorisation du chevauchement avec la considération des retouches [Berthaut et al., 2014]. Parmi les extensions des concepts de ressources, nous citons la considération de ressources non renouvelables, les ressources doublement restreintes et partiellement restreintes [Alvarez-Valdes et al., 2006; Brucker et al., 1999; Weglarz, 1980]. L'objectif du RCPSP standard est la minimisation de la durée de projet. D'autres fonctions-objectif basées sur le temps, la valeur actuelle nette, le coût, la robustesse ou des objectifs multiples ont également été proposées [Hartmann et Briskorn, 2010]. L'ordonnancement multi-projet est également une extension du problème RCPSP standard où plusieurs projets partageant au moins une ressource sont réalisés en parallèle [Gonçalves et al., 2008; Kumanan et al., 2006]. L'ordonnancement dans un environnement stochastique est une autre extension du problème RCPSP classique qui considère les données déterministes. Cette extension sera traitée en détail dans la section 2.4.2 puisque nous nous intéressons dans cette thèse au concept d'incertitude.

Les méthodes de résolution du problème RCPSP comprennent les méthodes exactes, les heuristiques basées sur les règles de priorité et les métaheuristiques comme les méthodes de recherche locale et les méthodes de recherche par population. Pour une revue détaillée des méthodes de résolution du problème RCPSP ainsi que les extensions et variantes du RCPSP

standard, le lecteur est prié de consulter les références suivantes [Brčić et al., 2012; Hartmann et Briskorn, 2010; Herroelen, 2005; Kolisch et Padman, 2001].

2.4 Considération de l'incertitude dans le processus de planification

2.4.1 En pratique

La plupart des gestionnaires de projet utilisent des logiciels de gestion de projet pour la planification [Trautmann et Baumann, 2009]. Liberatore et Pollack-Johnson [1998] ont conduit un sondage auprès de 688 membres du PMI (*Project Management Institute*) choisis de façon aléatoire. Un total de 240 réponses a révélé que pratiquement tous les gestionnaires de projet utilisaient les logiciels de gestion de projets dans une certaine mesure. Parmi ceux qui utilisent ces logiciels, environ 95% l'utilisent pour la planification et 80% pour le contrôle [Herroelen, 2005].

Jusqu'à cette dernière décennie, la plupart des logiciels commerciaux généraient des échéanciers déterministes sans aucune protection contre l'incertitude, bien que la possibilité d'effectuer des analyses de risque basées sur la simulation Monte Carlo ait été incorporée dans plusieurs logiciels [Herroelen, 2005]. L'analyse de risque d'un échéancier est une méthodologie qui permet d'évaluer le risque relié à un plan de projet et prévoir l'impact des déviations des durées et coûts sur les objectifs de projet [Vanhoucke, 2012, 2013, 2015]. Cependant cette technique n'a pas pour but de rendre l'échéancier plus robuste en le protégeant contre les incertitudes, mais plutôt d'aider les gestionnaires à concentrer leurs efforts sur les activités et ressources les plus problématiques et influentes sur les objectifs du projet. L'approche est composée de quatre étapes. La première consiste à produire un échéancier de projet avec la méthode du chemin critique CPM. La deuxième étape consiste à définir les distributions de probabilité des paramètres incertains de durées/coûts. Ensuite, les simulations Monte-Carlo sont conduites dans la troisième étape. À chaque simulation, on génère aléatoirement les valeurs des paramètres incertains depuis leurs distributions stochastiques et un nouvel échéancier est produit avec une durée/coût différent. Une fois le processus de simulation achevé, la dernière étape consiste à conduire des analyses de sensibilité. Les mesures les plus communes calculées à l'issue de cette analyse de risque sont

l'impact estimé des variations de la durée d'une activité sur la durée totale du projet et l'impact estimé des changements de coûts d'une activité sur le coût du projet [Vanhoucke, 2015].

Ces dernières années, la méthode de la chaîne critique CC/BM (*Critical Chain/Buffer Management*) développée par Goldratt a reçu beaucoup d'attention dans le milieu des projets [Herroelen, 2005]. Elle a été implantée dans des logiciels commerciaux, soit comme un module qu'on peut ajouter à des logiciels populaires de planification de projet comme *Microsoft Project* ou comme partie intégrante d'un nouveau logiciel de planification de projet. Le principe de la méthode est de développer un échéancier qui fournit une durée de projet fiable en utilisant des techniques d'insertion de marges de temps [Ma et al., 2014]. Un premier échéancier est d'abord généré sans considérer les contraintes de ressources en se basant sur la méthode du chemin critique. Les activités commencent à leur date de début au plus tard et les estimations de leurs durées sont basées sur un niveau de confiance de 50%. Ensuite les conflits de ressources sont identifiés et gérés en décalant les activités en amont. La chaîne critique est ensuite identifiée comme l'enchaînement le plus long qui détermine la durée du projet. Contrairement au chemin critique, la chaîne critique prend en compte les ressources. Si plusieurs chaînes critiques sont identifiées, on choisit une aléatoirement. Trois types de marges sont ensuite utilisés. Le *buffer* de projet est un tampon de temps global inséré à la fin de la chaîne critique. Les *buffers* d'alimentation ou auxiliaires (*feeding buffers*) sont des tampons de temps insérés à la fin de chaque chaîne non critique qui mène vers une activité appartenant à la chaîne critique. La taille par défaut des *buffers* est 50% de la longueur de la chaîne menant au *buffer*. La méthode regroupe ainsi les marges de sécurité individuelles des activités sur la chaîne dans une marge de sécurité globale placée à la fin de la chaîne en question. Le troisième type de marge, appelé *buffer* de ressource est souvent sous la forme d'un avertissement préalable communiqué à chaque fois qu'une activité de la chaîne critique a besoin d'une ressource qui n'est pas utilisée par l'activité précédente sur cette chaîne [Herroelen et Leus, 2001; Schatteman et al., 2008].

Cependant, la méthode de la chaîne critique a fait l'objet de plusieurs critiques dans la littérature. Herroelen et Leus [2001] et Herroelen et al. [2002] expliquent que cette méthode a permis d'ouvrir les yeux sur l'importance de la considération de l'incertitude dans le processus de planification, mais a tendance à trop simplifier le problème. Parmi les critiques, on cite la surestimation de la taille des *buffers* de temps et la focalisation sur une seule chaîne critique qui

pourrait ne plus représenter la chaîne la plus longue une fois des conflits de ressources surgissent. Ces conflits peuvent survenir quand les *buffers* de temps auxiliaires sont insérés et les activités sur la chaîne en question repoussées en arrière. Des conflits peuvent également survenir durant l'exécution du projet une fois les *buffers* pénétrés, ce qui empêche ces *buffers* d'agir comme un véritable mécanisme proactif. La chaîne critique peut également changer dans le cas de variations dans les disponibilités et exigences en ressources. Russell [2013] affirme aussi qu'il y a peu sinon aucune publication de projets de construction où cette méthode a été utilisée avec succès.

Dans les projets de construction, la méthode CPM reste la méthode de planification la plus souvent utilisée. CPM est souvent utilisée conjointement avec la méthode PERT. L'inconvénient majeur de ces deux techniques est qu'elles ne tiennent pas compte des contraintes de ressources. Les contraintes de ressources sont souvent considérées dans une deuxième étape à l'aide d'une méthode de lissage de ressources. Ces techniques ne permettent pas non plus de protéger le plan de projet contre les incertitudes. Même si la méthode PERT tient compte des incertitudes dans les durées des activités, elle permet uniquement d'évaluer la probabilité d'accomplir le projet dans les délais souhaités et elle se concentre sur un seul chemin critique sachant que d'autres chemins peuvent également devenir critiques dû au facteur de l'incertitude. Afin de se protéger contre les incertitudes, les planificateurs ont tendance à ajouter des marges de temps aux durées des activités dont ils sont responsables [Park et Peña-Mora, 2004; Russell, 2013]. Ces tampons de temps sont malheureusement souvent sujets à la loi de Parkinson ou au syndrome de l'étudiant [Lechler et al., 2005]. La loi de Parkinson affirme que les gens vont toujours utiliser ces marges de temps puisque tout travail tend à se dilater jusqu'à occuper tout le temps qui lui est imparti. Le syndrome de l'étudiant est basé sur la tendance des gens à gaspiller leur marge en commençant les activités plus tard ou même le plus tard possible sans impacter la prochaine activité ou leur échéance. Goldratt [1997] argumente également qu'au lieu que ces marges soient utilisées pour faire face à l'incertitude et variations, elles sont plutôt utilisées comme parties intégrantes de la durée de l'activité.

Les grands projets d'ingénierie et de construction sont caractérisés par l'approvisionnement en équipements majeurs dont les longs délais de livraison sont sujets à un degré élevé d'incertitude. Afin de pallier cette incertitude, les planificateurs insèrent une marge de temps entre la date de livraison promise par le fournisseur d'équipement et la date requise au chantier pour le début des

travaux au chantier [Yeo et Ning, 2006]. Généralement, la fabrication et les dates de livraison des équipements majeurs peuvent être prolongées de plusieurs mois à plus d'un an, en particulier pour les items achetés d'outre-mer [Yeo et Ning, 2006]. Cependant, la durée de ces marges est souvent établie de façon subjective et arbitraire. Yeo et Ning [2006] ont réalisé un sondage auprès de 189 grandes compagnies de construction à Singapour à propos de grands projets impliquant l'approvisionnement d'équipements majeurs. Le sondage a révélé que parmi les projets étudiés, à peu près 50% des équipements arrivent au chantier juste à temps, 20% plus tard que requis et 30% plus tôt que requis.

2.4.2 Modèles d'ordonnancement de projets considérant l'incertitude

La majorité des approches d'ordonnancement de la littérature considérant l'incertitude sont basées sur le problème RCPSP du niveau opérationnel. Il existe principalement deux approches pour faire face à l'incertitude : l'ordonnancement proactif et l'ordonnancement réactif. L'ordonnancement proactif consiste à incorporer des marges de sécurité dans l'échéancier de référence (ou échéancier prédictif) afin d'absorber les perturbations futures causées par les incertitudes, c.à.d. visant la robustesse [Van de Vonder, 2006]. L'ordonnancement réactif consiste à réviser ou réoptimiser un échéancier quand un événement imprévu se produit [Pellerin, 1997; Van de Vonder et al., 2007b]. À un extrême, l'ordonnancement réactif peut ne pas être basé sur un échéancier prédictif. Les décisions d'ordonnancement sont dynamiques et effectuées durant l'exécution de projet à des points de décision stochastiques, correspondant aux dates de fin des activités. Les décisions sont basées sur des politiques d'ordonnancement qui permettent de déterminer les activités à exécuter en se basant sur l'observation du passé et la connaissance a priori des distributions des durées des activités et des contraintes de ressources. Cependant, il est préférable dans le domaine de la gestion de projet d'avoir un échéancier de référence. Ce dernier accomplit plusieurs fonctions importantes [Aytug et al., 2005; Van de Vonder et al., 2006b], parmi lesquelles le fait qu'il constitue la base des arrangements contractuels avec les fournisseurs et sous-traitants et des engagements envers le client. Il est à noter qu'une approche proactive va généralement nécessiter une composante réactive afin de gérer les perturbations qui ne peuvent être absorbées dans l'échéancier de référence.

Un échancier de référence est dit robuste s'il est insensible aux perturbations qui peuvent se produire durant l'exécution de projet [Van de Vonder et al., 2006b]. Plusieurs types de robustesse ont été définis dans la littérature. Les deux mesures couramment utilisées sont la robustesse de la qualité et la robustesse de la solution [Herroelen et Leus, 2005]. La mesure de la robustesse de la qualité réfère à l'insensibilité d'un échancier aux perturbations qui affectent les indicateurs de performance utilisés pour évaluer sa qualité. En d'autres termes, la robustesse de la qualité est définie comme étant l'insensibilité de la valeur de la fonction-objectif de l'échancier de référence aux perturbations dans les données du problème. Maximiser le niveau de service d'un projet qui correspond à la probabilité que la valeur de la fonction-objectif ne dépasse pas un certain seuil est une façon de mesurer la robustesse de la qualité [Van de Vonder et al., 2007b]. Pour le problème RCPSP classique où la fonction-objectif correspond à la durée de projet, on doit maximiser la probabilité de finir le projet dans un délai donné. La robustesse de la solution ou stabilité de l'échancier réfère quant à elle à l'insensibilité des dates prévues de début des activités dans l'échancier de référence aux perturbations des données. La fonction de stabilité de coût qu'on cherche à minimiser est la suivante : $Stab = \sum_{j \in N} w_j * E|s_j - s_j|$. Le paramètre w_j représente le coût engendré par la variation de la date de début de l'activité j . s_j représente la date de début réelle de l'activité j et s_j sa date prévue de début.

La recherche sur les approches proactives visant la robustesse de la qualité est plutôt rare [Van de Vonder et al., 2007b]. On propose dans la littérature de résoudre le problème RCPSP classique en considérant les durées moyennes des activités. Ainsi, minimiser la durée du projet permet de produire un échancier qui maximise la probabilité que le projet finisse dans un délai donné, une mesure de la robustesse de la qualité [Van de Vonder et al., 2007b]. Cependant, les auteurs ne précisent pas comment ce délai doit être fixé. La méthode de la chaîne critique peut être considérée comme une méthode proactive visant la robustesse de la qualité de l'échancier.

Concernant les approches d'ordonnancement proactives visant la robustesse de la solution, la plupart des approches proposées dans la littérature sont composées de deux étapes. La première étape consiste à générer un échancier initial de durée minimale en résolvant le problème d'ordonnancement RCPSP avec les durées déterministes les plus probables des activités. La deuxième étape consiste à modifier le premier échancier en insérant des tampons de temps avant

les activités les plus critiques afin de protéger leur date de début des perturbations dans les durées des prédécesseurs transitifs dans le réseau original et le RFN (*Resource Flow Network*) [Van de Vonder et al., 2005, 2008; Van de Vonder et al., 2006a; Van de Vonder et al., 2006b] et tout en respectant la date de fin au plus tard du projet définie en majorant d'un certain pourcentage la durée de projet minimale trouvée à l'issue de la première étape. Le RFN est un réseau qui contient les mêmes nœuds que le réseau du projet original, mais dont les arcs connectent deux nœuds s'il existe un flux de ressources entre ces activités [Artigues et Roubellat, 2000]. Le RFN permet donc d'identifier comment s'effectue le transfert de chaque ressource entre les activités dans l'échéancier. Considérer les relations de précédence du RFN construit à partir de l'échéancier initial permet d'insérer des tampons de temps entre les activités sans violer les contraintes de ressources. La criticité des activités est déterminée en fonction de leur poids qui représente le coût marginal associé au fait de commencer l'activité avant ou après sa date de début prévue ou bien en fonction de la variance des durées des prédécesseurs transitifs dans le réseau original et le RFN.

Parmi les principales méthodes d'ordonnancement proactives visant la robustesse de la solution utilisées dans la littérature, nous citons l'heuristique RFDFF (*Resource Flow Dependent Float Factor*) proposée par Van de Vonder et al. [2006a] qui protège l'échéancier initial en insérant des tampons de temps avant les activités en fonction de leur poids et des poids de leurs prédécesseurs et successeurs transitifs dans les deux réseaux. Leur approche permet d'insérer des tampons de temps plus longs avant les activités qui engendreraient des coûts élevés si elles ne commencent pas à leur date de début prévue. L'heuristique VADE (*Virtual Activity Duration Extension*) proposée par Van de Vonder et al. [2008] permet quant à elle d'insérer des tampons de temps dans l'échéancier initial en se basant sur la variabilité des durées des activités. Les écarts types des durées des activités sont utilisés pour calculer itérativement des extensions virtuelles des durées des activités. Ces durées étendues virtuelles sont utilisées pour mettre à jour les dates de début des successeurs dans les deux réseaux et ainsi d'insérer des tampons de temps dans l'échéancier de référence. L'échéancier protégé obtenu est donc composé des dates de début mises à jour et des durées les plus probables des activités prévues initialement.

L'heuristique STC (*Starting Time Criticality*) proposée par Van de Vonder et al. [2008] permet d'exploiter les informations concernant les poids des activités et la variabilité des durées des

activités. À partir de l'échéancier déterministe initial, l'heuristique génère itérativement des échéanciers intermédiaires en insérant un tampon d'une unité de temps avant l'activité dont la date de début est la plus critique dans l'échéancier intermédiaire courant, jusqu'à ce que l'ajout de tampons de sécurité n'améliore plus la stabilité de l'échéancier. La criticité de la date de début d'une activité est définie en fonction de son poids et de la probabilité qu'elle soit retardée en fonction des distributions des durées de ses prédécesseurs transitifs dans les deux réseaux (le réseau original et le RFN). À chaque fois qu'une activité est retardée, les dates de début de ses successeurs transitifs dans les deux réseaux sont mises à jour si nécessaire. Des heuristiques et méta-heuristiques basées sur des phases d'amélioration ont également été proposées dans la littérature. Nous citons à titre d'exemple la méta-heuristique de recherche taboue proposée par Van de Vonder et al. [2005] qui débute de l'échéancier établi par l'heuristique VADE, mais exploite à chaque itération le voisinage de la solution courante et choisit la solution de voisinage qui permet de trouver le meilleur coût de stabilité estimé par simulation. La recherche taboue est arrêtée après un certain nombre d'itérations prédéfini. Van de Vonder et al. [2008] ont comparé la performance de ces heuristiques à l'aide de la simulation. L'expérience révèle que l'heuristique STC donne les meilleurs résultats parmi les heuristiques qui ne comportent pas de phase d'amélioration. En incluant les approches reposant sur une phase d'amélioration, c'est la recherche taboue qui donne les meilleurs résultats. Elle requiert cependant beaucoup de temps de calcul.

2.5 Analyse critique de la littérature

Les plans de planification agrégée proposés au niveau tactique pour les grands projets d'ingénierie et de construction proposent le même niveau d'agrégation pour le court terme, moyen et long terme. Cependant, le niveau de détail et d'exactitude des informations disponibles pour le court terme n'est pas le même que pour les périodes plus éloignées vu la grande taille de ces projets. Aussi, la grande taille des projets étudiés fait qu'il y a plus d'entités à gérer et les méthodes de résolution ont du mal à résoudre les grands problèmes. Il serait donc plus judicieux de proposer un plan intégrant plusieurs niveaux d'agrégation afin de profiter des informations détaillées disponibles à court terme et se contenter d'un plan grossier pour les périodes plus éloignées. Ce plan doit être mis à jour périodiquement afin d'intégrer les informations qui se

précisent avec la progression du projet. Cette technique de variation du niveau d'agrégation a déjà été introduite pour les activités de l'échéancier dans le *CIOB Guide (The Chartered Institute of Building)* [Building, 2011]. Ce guide a élaboré le concept de la densité de l'échéancier qui correspond au niveau de détail dans la définition des activités. Cette densité diminue en aval de la date d'établissement de l'échéancier. Une densité élevée est proposée pour les activités ayant lieu dans les trois premiers mois. Une densité moyenne est proposée pour les activités planifiées entre trois et neuf mois suivant la date d'élaboration de l'échéancier et une densité faible pour les activités planifiées après neuf mois de cette date. Les activités à faible densité peuvent durer plusieurs mois. Les activités à densité moyenne ont une durée inférieure à deux mois tandis que les activités à haute densité ont une durée inférieure à la période de mise à jour de l'échéancier. Cette technique peut cependant s'avérer difficile à implanter et peut conduire à un échéancier désordonné [De Leon, 2011]. Dans cette thèse, nous proposons une technique plus simple de variation du degré d'agrégation : celui des périodes de planification.

La majorité des modèles de planification tactique sont des modèles déterministes qui supposent les données d'entrée connues avec exactitude. Généralement, ces modèles sont développés sous l'hypothèse que les incertitudes sont implicitement traitées en choisissant le niveau approprié d'agrégation [Wullink, 2005]. Cependant, tenir compte explicitement de l'incertitude dans les modèles de planification tactique peut grandement améliorer l'efficacité d'un plan comparativement à une approche déterministe [Alfieri et al., 2012; Carvalho et al., 2016; Wullink, 2005]. De plus, au meilleur de notre connaissance, aucun modèle de planification tactique ne considère l'incertitude liée à l'agrégation. Dans un contexte de planification de production ETO, Wullink [2005] aborde le problème de l'incertitude qui provient de l'agrégation des opérations du niveau opérationnel en activités au niveau tactique. Dans le contexte de planification de projet, nous étendons le terme d'incertitude liée à l'agrégation pour désigner l'incertitude liée à toutes les données agrégées, incluant les capacités agrégées sur les périodes étendues du niveau tactique et les lots de travaux qui représentent une agrégation d'activités détaillées. En effet, au niveau tactique, les planificateurs se contentent d'estimations agrégées grossières afin de générer un échéancier global de projet pour des objectifs commerciaux et de gestion à haut niveau. En passant à un niveau inférieur dans la hiérarchie de planification (niveau opérationnel), ces estimations sont désagrégées et une partie de l'échéancier est affinée, ce qui

peut conduire à des dépassements de coût, retards dans les échéances ou des infaisabilités si les variations causées par ce type d'incertitude ne sont pas anticipées dans un plan tactique robuste.

Au niveau tactique, le type de robustesse qui nous intéresse est la robustesse de la qualité, c'est-à-dire le degré de respect attendu de la mesure de performance de l'échéancier. Les mesures de performance courantes sont le coût et la durée du projet. En effet, comme expliqué précédemment, le but principal de l'échéancier tactique est de soumettre un coût et une durée de projet adéquats et fiables. L'autre type de robustesse, à savoir la robustesse de la solution est plus pertinente au niveau opérationnel, où on est plus intéressé par élaborer des calendriers de travail et les suivre durant l'exécution. À ce niveau détaillé, il est pertinent de vouloir maximiser la robustesse de la solution, c'est-à-dire la stabilité ou degré de respect attendu des dates de début de toutes les activités. Néanmoins, au niveau tactique, en plus du coût et de la durée du projet, certaines dates contractuelles doivent également être fixées. Ces dates peuvent correspondre aux dates de livraison ou d'installation d'équipements majeurs. En effet, les grands projets de construction requièrent souvent des équipements lourds dont le transport peut aller de plusieurs mois à plus d'un an et leurs dates « requis au chantier » doivent être établies bien à l'avance [Yeo et Ning, 2006]. La non-exactitude de ces dates peut entraîner des coûts importants liés aux coûts de maintien, de stockage ou de location de ces équipements. Maximiser la stabilité de certaines dates peut donc s'avérer nécessaire au niveau tactique, mais pas toutes les dates comme au niveau opérationnel. D'où le besoin de proposer des approches proactives de planification adaptées aux caractéristiques du niveau tactique.

Côté modélisation, les approches proactives d'ordonnancement proposées pour le problème RCPSP ne sont pas adaptées au problème RCCP comme expliqué dans ce qui suit. Rappelons que les approches proactives du niveau opérationnel sont généralement composées de deux étapes. La première consiste à optimiser la durée du projet et la deuxième étape est une heuristique ou méta heuristique qui insère des marges de temps dans le premier échéancier de façon itérative jusqu'à un critère d'arrêt et tout en respectant une date limite. À chaque itération, une marge d'une ou plusieurs unités de temps est insérée avant l'activité sélectionnée et l'échéancier est mis à jour en décalant les activités successeurs. Cependant, dans le problème RCCP, les lots de travaux n'ont pas des durées prédéfinies, mais sont plutôt caractérisés par des charges de travail requises. La consommation périodique des lots de travaux en ressources peut varier d'une période à l'autre

ainsi que les capacités des ressources sur les périodes. Les capacités sont également souvent flexibles et peuvent être augmentées à un certain coût. Insérer donc un tampon de temps avant un lot de travail ne va pas simplement le décaler ainsi que ses successeurs comme au niveau opérationnel, puisque les capacités et les consommations des lots de travaux en ressources varient d'une période à l'autre. Les décisions à prendre suite au décalage de la date de début d'un lot sont nombreuses, à savoir sa nouvelle durée, ses nouvelles consommations périodiques en ressources ainsi que celles des lots réalisés en parallèle et dans les périodes futures.

D'autre part, la notion du réseau de flux de ressources RFN utilisée par ces approches n'est pas adaptée au problème RCCP. En effet, la notion de passation des ressources entre les lots de travaux n'existe pas puisque les consommations de ressources sont évaluées globalement sur les périodes agrégées et les lots peuvent débuter ou finir à l'intérieur d'une période. De plus, les capacités peuvent changer d'une période à l'autre.

Certaines approches proactives proposées pour le problème RCPSP se basent sur les distributions de probabilité des durées des activités pour l'insertion des marges de temps. Au niveau tactique toutefois, l'augmentation de la charge de travail d'un lot n'implique pas nécessairement l'augmentation de sa durée étant donnée la flexibilité dans les capacités et les affectations périodiques des ressources.

L'insertion des marges de temps dans l'échéancier non protégé se fait à travers plusieurs itérations. À chaque itération, la robustesse de la solution intermédiaire est évaluée soit par une fonction-objectif approchée ou par simulation. La simulation reste la méthode d'évaluation donnant les meilleurs résultats. Elle requiert cependant beaucoup de temps de calcul. Quant à l'évaluation approchée, elle donne des résultats moins bons, mais plus rapides [Deblaere et al., 2011]. Duchesne [2013] a étudié la corrélation entre la valeur de la mesure approchée de robustesse utilisée par l'heuristique STC avec le coût de stabilité obtenu par simulation afin de s'assurer que la mesure utilisée par la méthode STC offre une bonne approximation de la robustesse. L'auteur trouve une faible corrélation entre les deux valeurs de robustesse. Il est à noter que l'heuristique STC obtient les solutions les plus robustes parmi les méthodes qui ne sont pas basées sur la simulation.

On conclut sur le besoin d'une approche proactive adaptée au problème RCCP du niveau tactique et moins complexe afin d'avoir plus de chances d'être appliquée en pratique. Le succès de la méthode de la chaîne critique dans la pratique prouve que les planificateurs apprécient les méthodes simples.

2.6 Conclusion

La planification tactique joue un rôle important dans le succès des grands projets d'ingénierie et de construction comme étant la base d'engagements contractuels à long terme avec les différentes parties prenantes du projet. Suite à la revue critique de la littérature, plusieurs limitations ont été relevées dans les approches actuelles de planification tactique, que ce soit celles proposées dans la littérature scientifique ou celles appliquées en pratique. Ces limitations, en particulier la considération des incertitudes caractérisant le niveau tactique et la proposition d'approches proactives adaptées aux caractéristiques du problème RCCP, constituent des opportunités de recherche qui sont abordées dans cette thèse. Le chapitre suivant présente notamment les objectifs de recherche de cette thèse et la méthodologie suivie pour y répondre.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre présente les objectifs de recherche principaux de la thèse suite à l'analyse critique de la littérature présentée dans le chapitre précédent. On y présente également les hypothèses principales de recherche ainsi que la démarche suivie pour répondre aux objectifs de la thèse.

3.1 Objectifs et hypothèses de recherche

L'objectif principal de cette recherche est de proposer des approches de planification tactique adaptées au contexte complexe, incertain et dynamique des grands projets d'ingénierie et de construction. Cet objectif peut être subdivisé en plusieurs sous-objectifs :

- Sous-objectif 1 : Proposer une approche de planification tactique qui tienne compte de la variabilité dans le niveau de disponibilité et de précision des données selon la durée qui sépare la date d'établissement de l'échéancier de la date où la donnée est prévue avoir lieu/se réaliser.
- Sous-objectif 2 : Mesurer les effets de l'incertitude liée à l'agrégation et aux charges de travail sur la robustesse et performance de l'échéancier développé au niveau tactique.
- Sous-objectif 3 : Proposer des approches proactives de planification tactique qui maximisent la robustesse de la qualité de l'échéancier sous l'influence des incertitudes citées plus haut. La qualité de l'échéancier réfère au coût ou à la durée du projet dépendamment de la fonction-objectif utilisée.
- Sous-objectif 4 : Proposer des approches proactives de planification tactique qui maximisent la stabilité des dates jalons contractuelles pertinentes sous l'influence des incertitudes citées plus haut.

Ces objectifs reposent sur les hypothèses suivantes :

- L'agrégation des données au niveau de planification tactique peut conduire à des estimations de coût et de durées peu réalistes.
- Intégrer l'incertitude de façon explicite dans la génération des échéanciers au niveau tactique permet d'améliorer la robustesse des échéanciers.

- L'effet des incertitudes sur la robustesse et la performance de projet dépend des caractéristiques du projet, notamment sa taille (nombre de lots de travaux et de groupes de ressources).

3.2 Démarche de recherche

La stratégie de recherche consiste à proposer d'abord un modèle déterministe destiné au niveau tactique des grands projets d'ingénierie et de construction. Ce modèle sera évalué par simulation afin de mesurer l'impact des incertitudes sur sa performance et robustesse dans un contexte incertain. Par la suite, des modèles proactifs considérant l'incertitude seront développés. Ces modèles seront également testés en utilisant la simulation et seront comparés au modèle déterministe de base. En effet, afin de valider la pertinence des modèles proactifs, les chercheurs les comparent aux modèles déterministes correspondants ou à d'autres modèles proactifs existants. Dans notre cas cependant, il n'existe pas des modèles proactifs destinés au niveau tactique, qui partagent nos mêmes hypothèses de modélisation et qui considèrent les mêmes types d'incertitude auxquels nous pourrions nous comparer.

Pour résoudre les différents modèles proposés dans cette thèse, nous utilisons des méthodes de résolution exacte. En effet, il est toujours préconisé lors de développement de nouveaux modèles de les résoudre d'abord de façon exacte. Des méthodes approchées peuvent être développées dans un deuxième temps. Leur qualité est évaluée en les comparant aux valeurs optimales trouvées par les méthodes exactes. Les différents modèles développés seront testés sur des instances de projet fictives qui essaient de reproduire les caractéristiques des projets réels. Cette démarche est préconisée dans la littérature vue la difficulté d'obtenir les données nécessaires d'un projet réel dans un temps raisonnable. Aussi, cette approche d'expérimentation permet de tester les modèles sur un grand nombre d'instances de projet. Ainsi, des études statistiques sur l'influence des paramètres de projet sur les objectifs recherchés sont possibles.

La démarche de recherche suivie, illustrée à la Figure 3-1 se résume ainsi :

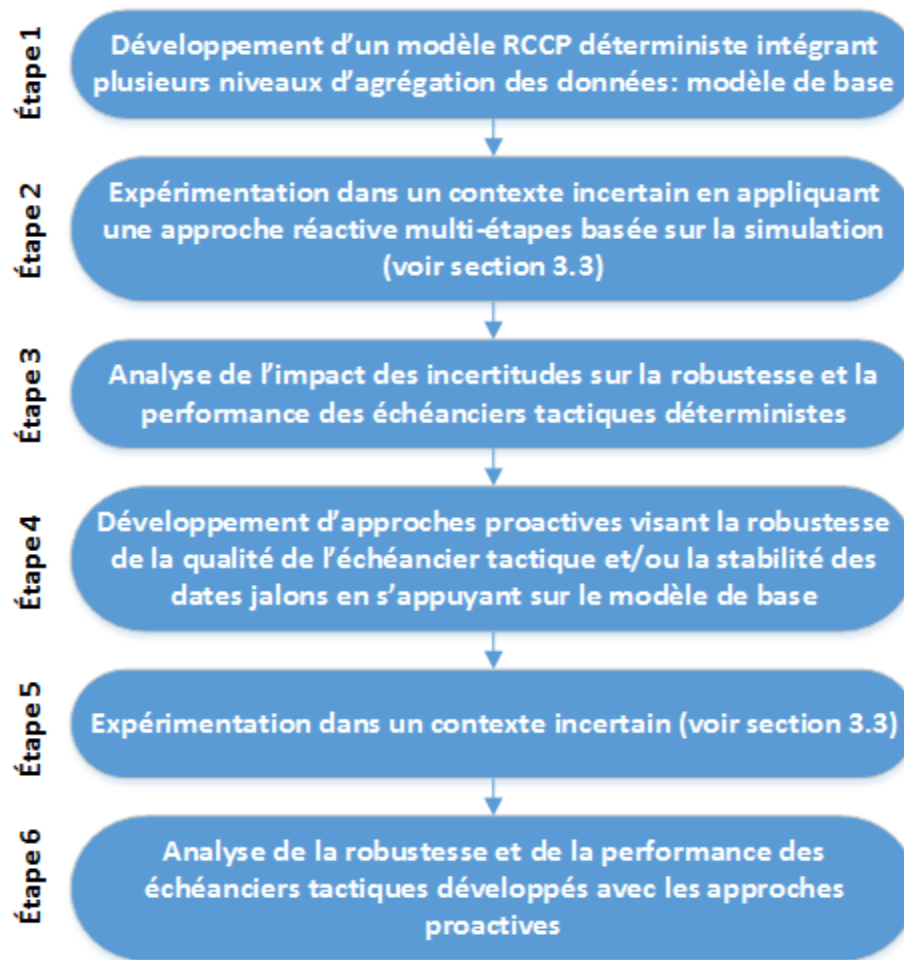


Figure 3-1: Démarche de recherche

La première étape consiste à répondre au premier sous-objectif en proposant un modèle RCCP où l'on fait varier les durées des périodes selon les degrés d'incertitude qui y sont reliés. Ainsi, les premières périodes sont considérées détaillées avec des estimations précises de disponibilités de ressources tandis que les périodes plus éloignées sont considérées agrégées avec des estimations plus grossières de disponibilités de ressources. Ce modèle, nommé modèle de base, est considéré déterministe puisqu'il ne tient pas compte explicitement de l'incertitude en protégeant l'échéancier contre les perturbations anticipées. Deux variantes de ce modèle sont proposées : le *time-driven* RCCP qui minimise le coût du projet et le *resource-driven* RCCP qui minimise la durée du projet.

La deuxième étape correspond à la phase d'expérimentation. Le modèle de base est testé sur des instances de projets fictifs qui essayent de reproduire les principales caractéristiques des projets réels. Pour le modèle *time-driven* RCCP, nous utilisons les instances de De Boer [1998] couramment utilisées en littérature. Quant au modèle *resource-driven* RCCP, aucun ensemble d'instances de planification agrégée n'a été proposé pour cette variante du problème. Nous allons donc adapter les instances de De Boer [1998] afin de tenir compte de l'hypothèse de rigidité des capacités de ressources. La phase expérimentale permet d'évaluer le comportement du modèle dans un contexte incertain qui se rapproche le plus possible de la réalité. Ainsi, plusieurs scénarios de projet sont générés et une approche réactive multi-étape est appliquée à chaque fois afin de réagir aux aléas au fur et à mesure qu'ils apparaissent. Le cadre expérimental est décrit en détail dans la section 3.3.2.

La troisième étape permet de répondre au sous-objectif 2 en analysant à l'issue de la phase expérimentale l'impact des incertitudes sur la performance et la robustesse des échéanciers développés avec le modèle RCCP déterministe. Afin de mesurer l'effet de l'incertitude des charges des lots, nous faisons varier dans l'expérimentation le niveau de variabilité dans les charges. Quant à l'incertitude liée à l'agrégation des capacités, nous comparons le comportement du modèle RCCP agrégé à un modèle désagrégé où toutes les périodes sont considérées détaillées avec des capacités considérées certaines.

La quatrième étape de la démarche permet de répondre aux objectifs 3 et 4 de notre recherche, à savoir proposer des approches proactives de planification tactique qui anticipent les perturbations relevées dans l'étape précédente causées par les incertitudes. Une approche proactive est ainsi proposée pour la variante *time-driven* du problème RCCP qui vise la robustesse de la qualité de l'échéancier tactique, à savoir son coût. Un ensemble d'approches proactives sont également développées pour la variante *resource-driven* du problème RCCP qui visent et la robustesse de la qualité de l'échéancier tactique, sa durée dans ce cas, et la stabilité des dates jalons pertinentes.

La cinquième étape correspond à la phase d'expérimentation des approches proactives développées. De même, une approche réactive multi-étape basée sur la simulation est appliquée à cet effet comme décrit dans la section 3.3.2. Pour chacune des deux variantes du problème RCCP, les mêmes instances de projet sur lesquelles le modèle RCCP déterministe a été testé sont

utilisées pour les modèles RCCP robustes. Pour le *resource-driven* RCCP, un paramètre est par contre ajouté aux instances, à savoir les dates jalons à protéger correspondant aux dates de début de quelques lots choisis aléatoirement.

Finalement la sixième et dernière étape correspond à l'analyse de la robustesse et de la performance des échéanciers robustes développés avec les différentes approches proactives. Ainsi, pour chacune des deux variantes du problème RCCP, les résultats de ou des approches proactives développées sont comparés aux résultats du modèle RCCP déterministe de base ainsi qu'aux résultats du modèle désagrégé. Cette étape permet donc de valider l'efficacité des approches proactives développées à l'étape 5 de la démarche pour répondre aux objectifs 3 et 4 de la thèse. Elle permet aussi de répondre à l'objectif 2 en analysant l'impact des incertitudes sur les échéanciers tactiques robustes comparés aux échéanciers tactiques non robustes.

Les étapes 1, 2 et 3 de la démarche sont traitées dans le chapitre 4. Les étapes 4, 5 et 6 sont traitées séparément pour les deux variantes du problème RCCP. Ainsi, les chapitres 5 et 6 présentent respectivement l'application de ces étapes au problème *time-driven* RCCP et au problème *resource-driven* RCCP.

3.3 Cadre expérimental

3.3.1 Définitions des appellations d'échéanciers

Nous commençons d'abord par définir le concept de scénario de projet. Ensuite, nous présentons les différentes appellations d'échéanciers utilisées dans cette thèse. Ces appellations sont utilisées tout au long de la thèse et en particulier dans la phase expérimentale. Il est à noter que la référence au niveau tactique a été omise des appellations pour des raisons de simplification.

Scénario de projet

Au niveau tactique, nous considérons les charges de travail des lots de travaux incertaines. Un scénario de projet est un vecteur de valeurs potentielles pour les charges de travail de chaque lot. Ce vecteur décrit une des réalisations possibles du projet.

Échéancier de référence

L'échéancier de référence (ou échéancier prédictif) est l'échéancier de projet développé au niveau tactique durant l'étape FEL 3 précédant la phase d'exécution du projet. Il a pour but de fixer la durée et/ou coût du projet ainsi que les dates jalons importantes. Ces éléments fixés sont la base d'engagements envers le client et autres parties prenantes impliquées. Ils deviennent ainsi des références que les planificateurs essaient de respecter au mieux. Les données, en particulier les charges de travail, sont estimées de façon grossière par les planificateurs au niveau tactique. Ainsi, l'échéancier de référence développé correspond à un scénario potentiel de projet qui diffère généralement du scénario observé à la fin du projet.

Les différents modèles RCCP développés dans cette thèse ont pour objectif de développer des échéanciers de référence. Les charges de travail sont considérées des variables aléatoires de paramètres connus et le scénario de projet le plus probable (composé des valeurs les plus probables de chaque variable) est utilisé pour générer l'échéancier de référence. L'objectif ultime est de développer des échéanciers de référence robustes qui maximisent la chance de respecter les engagements envers les différentes parties prenantes.

Échéancier initial

Comme nous le verrons dans la suite du document, les approches proactives destinées au problème *resource-driven* RCCP que nous proposons dans cette thèse sont des approches en deux phases. La première phase consiste à générer un échéancier initial non protégé qui a pour but de nous fournir la durée optimale du projet dans un contexte déterministe, alors que la deuxième phase a pour but de générer un échéancier de référence en se basant sur des techniques d'insertion de marges à l'intérieur d'un délai maximal de projet, obtenu en majorant la durée optimale par un certain pourcentage. L'échéancier initial est généré par le modèle RCCP de base développé à l'étape 1 de notre démarche de recherche (Figure 3-1). De même, le scénario de projet le plus probable est utilisé pour générer l'échéancier initial.

Échéancier réalisé

Dans un contexte réel, l'échéancier réalisé est une adaptation de l'échéancier de référence tenant compte du fait que le scénario de projet observé ne correspond pas au scénario initialement utilisé pour générer l'échéancier de référence. Dans un contexte incertain, l'échéancier réalisé va typiquement être inconnu avant la date finale du projet [Van de Vonder, 2006]. Dans notre thèse,

vu que les modèles développés ne sont pas testés sur des projets réels, un ensemble de scénarios de projet sont générés à partir des distributions des variables aléatoires. Pour chacun de ces scénarios, l'exécution de projet est simulée à l'aide de l'approche réactive décrite dans la prochaine section. Un échéancier réalisé est associé à chaque scénario de projet simulé et correspond à une occurrence d'échéancier lorsque toutes les données incertaines sont fixées.

Échéancier projeté

Dans la pratique, les planificateurs vont mettre à jour l'échéancier tactique à chaque nouveau point de décision afin de tenir compte des nouvelles informations disponibles en cet instant. À chacun de ces points de décision situés entre le début de la phase d'exécution du projet et la fin du projet, le passé correspond à une partie de l'échéancier réalisé et un échéancier projeté est développé pour le restant du projet. Cet échéancier projeté tient compte de l'observation du passé et des informations les plus à jour concernant le futur. Dans notre thèse, l'approche réactive utilisée dans la phase expérimentale essaye de reproduire ce contexte en générant de façon périodique un échéancier projeté.

3.3.2 Description du processus d'expérimentation

Figure 3-3 présente un diagramme du processus d'expérimentation utilisé pour évaluer les modèles et les approches développés dans cette thèse. Pour chaque instance de projet test, le modèle étudié est résolu pour générer l'échéancier de référence. Les outputs pertinents pour la variante du problème RCCP étudié (*time-driven* ou *resource-driven*) sont sauvegardés pour être comparés par la suite aux outputs réalisés à l'issue de la phase expérimentale. Ensuite, une centaine de scénarios de projet sont générés à partir des lois de distribution des charges de travail des lots supposées triangulaires (Figure 3-2). La valeur la plus probable de la distribution (VPP) correspond à la charge estimée pour générer l'échéancier de référence alors que la valeur minimale et maximale de la distribution sont définies à $1-\alpha$ et $1+\alpha$ fois cette valeur de référence. Étant donné que la courbe de la densité de probabilité est symétrique, la valeur la plus probable correspond à la valeur moyenne de la distribution. La valeur du paramètre $\alpha \in [0, 1[$ dépend du niveau de variabilité des charges de travail. En effet, comme expliqué dans la section 3.2, plusieurs niveaux de variabilité des charges sont considérés.

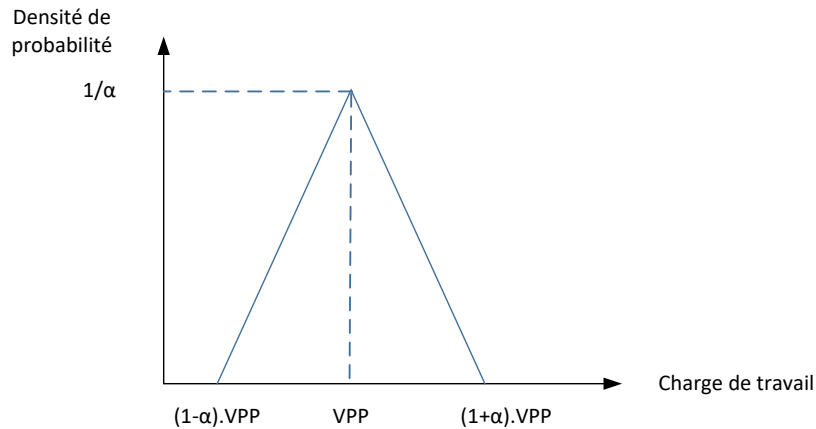


Figure 3-2: Loi de distribution de la charge de travail d'un lot donné

Ensuite, pour chaque instance de projet test, chaque scénario de projet généré fera l'objet d'une simulation en se basant sur une approche réactive multi-étape. Le point de départ de l'approche réactive correspond à l'échéancier de référence calculé avec le scénario de projet le plus probable. À chaque nouveau point de décision (t_{dp}) situé à la fin de chaque nouvelle période détaillée, un échéancier projeté sera calculé pour tenir compte de la réalité observée durant cette période et des informations les plus à jour connues à l'instant t_{dp} . À l'intérieur de chaque période, bien que l'échéancier projeté ne soit pas recalculé, un algorithme de simulation (étape 2 dans Figure 3-3) est utilisé pour modéliser les décisions que le planificateur de projet doit prendre pour tenir compte des écarts entre les valeurs estimées (VPP) et les valeurs observées. Durant cette période, nous supposons ne pas pouvoir aller chercher des ressources supplémentaires. Du coup, nous agissons principalement sur les durées. Cet algorithme est détaillé en annexes. À chaque nouveau point de décision, les données de l'instance de projet sont mises à jour comme suit (étape 3 dans Figure 3-3) : l'horizon est réduit de la durée de la période précédente, les lots terminés sont omis du réseau, les lots non encore débutés sont gardés avec leurs charges les plus probables comme dans l'échéancier de référence, tandis que les lots en cours d'exécution sont considérés avec leurs charges restantes réelles (selon le scénario simulé). Une fois tous les lots exécutés (en simulation), l'approche réactive s'achève et l'échéancier réalisé correspondant au scénario de projet simulé est obtenu. Les outputs réalisés (ex. durée et coût réalisés) sont alors récupérés.

Pour chaque instance test, une fois tous les scénarios générés sont simulés, plusieurs mesures reliées à la robustesse ou à la performance du modèle étudié sont calculées. La performance du modèle correspond au coût réalisé ou à la durée réalisée du projet selon la variante du problème RCCP étudiée. Les mesures reliées à la robustesse sont basées sur la comparaison de la moyenne des outputs réalisés sur tous les scénarios de projet simulés aux outputs de l'échéancier de référence basé sur le scénario le plus probable. Les outputs analysés vont dépendre de la variante du problème RCCP étudiée (*resource-driven* ou *time-driven*).

3.3.2.1 Adaptation au cas des approches proactives destinées au *resource-driven* RCCP

L'approche réactive présentée ci-haut est légèrement modifiée pour tester les approches proactives destinées au problème *resource-driven* RCCP. En effet, pour cette variante du problème nous cherchons en plus de maximiser la robustesse de la qualité de l'échéancier, de maximiser la stabilité des dates jalon correspondant aux dates de début de certains lots contractuels qu'on appelle lots critiques. Du coup, lors des ré-optimisations aux différents points de décisions, la fonction-objectif du modèle n'est plus la même que celle utilisée pour générer l'échéancier de référence. Elle correspond plutôt à minimiser les dépassements par rapport aux dates de début des lots et à la date de fin du projet fixées dans l'échéancier de référence afin de conserver l'avantage des marges de temps ajoutées dans ce dernier. Nous ajoutons également la contrainte que les lots critiques ne peuvent pas commencer avant leur date de début fixée dans l'échéancier de référence. Cette contrainte est appelée dans la littérature « *the constraint of railway scheduling* » [Van de Vonder et al., 2007a]. Elle est souvent utilisée dans les approches réactives pour maintenir la stabilité des dates de début des activités.

3.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'explicitier les objectifs et la démarche de notre travail de recherche. Notre démarche se distingue principalement des travaux de la littérature destinés au niveau tactique par le processus expérimental. En effet, soit les auteurs évaluent leurs modèles dans un contexte déterministe, ou bien ils évaluent la robustesse de leur modèle en utilisant des fonctions approchées de robustesse sans se baser sur la simulation. Cependant, ces techniques ne permettent pas de reproduire le contexte réel de déploiement progressif des aléas au fur et à

mesure que le projet progresse. Des approches réactives basées sur la simulation ont été par contre développées pour le problème RCPSP du niveau opérationnel. Aucune n'a pu être reprise vu les différences entre le problème RCPSP et le problème RCCP. Les deux variantes de l'approche réactive adoptée dans cette thèse sont une adaptation des approches réactives proposées par Van de Vonder et al. [2007b] au problème RCCP. Les trois prochains chapitres représentent le corps du travail de recherche réalisé dans cette thèse, à savoir le développement de tous les modèles et approches proposés ainsi que les résultats obtenus après l'application du processus expérimental explicité dans ce chapitre.

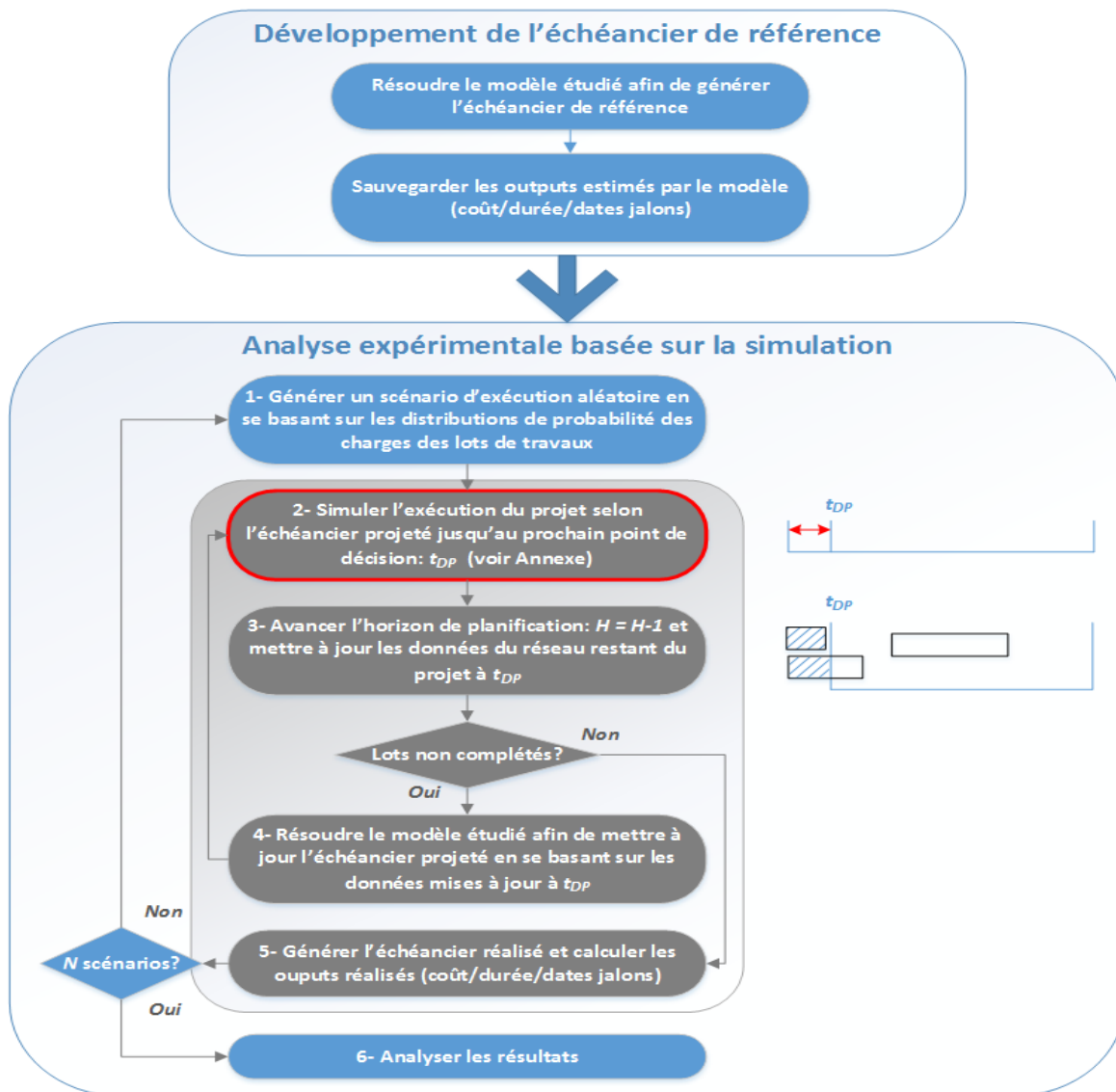


Figure 3-3: Diagramme décrivant le processus expérimental

CHAPITRE 4 MODÈLE RCCP DÉTERMINISTE INTÉGRANT PLUSIEURS NIVEAUX DE PLANIFICATION

Nous développons dans ce chapitre un modèle RCCP déterministe pour le niveau de planification tactique des grands projets d'ingénierie et de construction. Il constitue la base sur laquelle va se fonder les approches proactives présentées dans les chapitres ultérieurs. Deux variantes sont proposées : une pour le *time-driven* RCCP et l'autre pour le *resource-driven* RCCP. Le modèle proposé généralise le modèle de Haït et Baydoun [2012] en considérant les durées des périodes variables en fonction du degré d'incertitude et de l'effort souhaité de planification. Le modèle de Haït et Baydoun [2012] a été sélectionné comme modèle de base puisqu'il permet de combiner l'utilisation des variables discrètes pour une considération périodique des contraintes de ressources avec l'utilisation des variables continues pour la représentation des dates de début et de fin des lots. Ce modèle permet ainsi de régler les difficultés relevées dans le chapitre de revue à la section 2.3.2.1 quant à la modélisation des contraintes de précédence dans les modèles RCCP à temps discret. Pour chaque variante du problème, nous allons décrire les instances de projet utilisées pour tester le modèle ainsi que les résultats de l'expérimentation. Le chapitre est structuré comme suit. La section 4.1 décrit le problème. La section 4.2 présente la modélisation mathématique du problème. La section 4.3 décrit la génération d'instances pour les deux variantes du problème. Les sections 4.4 et 4.5 décrivent l'analyse expérimentale de la variante *resource-driven* et la variante *time-driven* du modèle RCCP respectivement. Le modèle proposé est déterministe, mais l'expérimentation est effectuée dans un contexte incertain afin d'évaluer l'impact de la non-considération de l'incertitude dans la phase de planification sur la performance et robustesse des plans tactiques. Finalement nous présentons nos conclusions dans la section 4.6.

4.1 Description formelle du problème

Nous considérons un horizon de planification H discrétisé en tranches de temps dont les durées ne sont pas nécessairement identiques. Nous appelons ces tranches de temps des périodes. Soit P l'ensemble des périodes (indice p) où chaque période a une durée D_p . Sans réduire le caractère général, nous supposons que l'horizon et les durées D_p sont exprimées en semaines. Soit I l'ensemble des lots de travaux (indice i) où chaque lot requière un sous-ensemble de l'ensemble R de groupes de ressources indépendants (indice r). Les lots de travaux sont reliés par des

relations de précédence génériques (c.à.d. en structure de réseau) de type fin-début sans décalage ou chevauchement. L'ensemble $Pred_i$ regroupe tous les prédécesseurs directs du lot i . Chaque lot exige une charge de travail Q_i pour être réalisé. La charge de travail Q_i d'un lot est définie comme étant la somme des charges requises Q_{ri} de chaque groupe de ressources r . Q_{ri} correspond à la quantité globale exigée par le lot i du groupe de ressources r . Par exemple, une charge requise de 20 hommes-jours peut être réalisée de plusieurs manières. 20 hommes peuvent travailler durant un jour ou deux hommes pendant dix jours ou encore un profil flexible de 5 hommes pendant deux jours et dix hommes pendant un jour. Un lot de travail peut requérir plusieurs groupes de ressources simultanément. Précisons que la proportionnalité dans l'utilisation des groupes de ressources par le lot i est supposée constante tout au long de son exécution. Prenons l'exemple d'un lot i réalisé par deux groupes de ressources $r = 1$ et $r = 2$ avec les proportionnalités respectives : $Q_{1i} = 0.4 * Q_i$ et $Q_{2i} = 0.6 * Q_i$. Cette proportionnalité est conservée sur toutes les périodes où le lot i est exécuté. Les paramètres Q_i^{max} et Q_i^{min} représentent respectivement la charge de travail maximale et minimale qui peut être assignée à i durant une semaine à cause de contraintes techniques, spatiales ou de gestion. Un lot a une date de lancement RD_i avant laquelle il ne peut pas débuter. Ces dates sont généralement définies par des facteurs externes comme des demandes de permis, des exigences de certificats ou des conditions météorologiques. Chaque groupe de ressources r a une capacité régulière K_{rp} (ex. 30 hommes-jours) disponible dans la période p . Pour la variante *time-driven* du problème RCCP, les capacités sont flexibles et l'objectif du modèle est la minimisation du coût de projet correspondant à l'usage des capacités non-régulières. Pour la variante *resource-driven* RCCP, les capacités sont fixes et l'objectif est la minimisation de la durée du projet.

4.2 Modélisation mathématique du problème

Le modèle RCCP proposé est un PLM composé de quatre types de contraintes :

- Les contraintes qui assurent le lien entre les variables continues et les variables binaires afin de positionner les dates de début et de fin des lots de travaux par rapport aux périodes;
- Les contraintes qui déterminent les durées des lots dans les périodes ;

- Les contraintes de temps et de séquence ; et
- Les contraintes de charge et de capacité.

Les notations des variables sont fournies dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1: Nomenclature - variables

Variable	Description
ts_i, tf_i	Date de début et de fin du lot de travail i
zs_{ip}	Variable binaire qui vaut 1 si ts_i se trouve dans la période p ou avant
zf_{ip}	Variable binaire qui vaut 1 si tf_i se trouve dans la période p ou avant
d_{ip}	Durée du lot i durant la période p ($0 \leq d_{ip} \leq D_p$)
x_{ip}	Intensité du lot i durant la période p ($0 \leq x_{ip} \leq 1$)
$yint_{rp}$	Utilisation interne du groupe de ressources r sur la période p
$yext_{rp}$	Utilisation externe du groupe de ressources r sur la période p
$Cmax$	Date de fin du projet
$coût$	Coût du projet

4.2.1 Contraintes de positionnement des dates par rapport aux périodes

Haït et Baydoun [2012] utilisent des variables binaires zs_{ip} et zf_{ip} pour indiquer la position relative des dates de début et de fin des lots par rapport aux périodes. Ces contraintes ont été généralisées pour tenir compte des durées variables des périodes :

$$ts_i \geq \sum_{k=1}^p D_k * (1 - zs_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.1)$$

$$ts_i \leq \sum_{k=1}^p D_k + \left(H - \sum_{k=1}^p D_k \right) * (1 - zs_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.2)$$

$$zs_{ip} \geq zs_{ip-1} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.3)$$

$$tf_i \geq \sum_{k=1}^p D_k * (1 - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.4)$$

$$tf_i \leq \sum_{k=1}^p D_k + \left(H - \sum_{k=1}^p D_k \right) * (1 - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.5)$$

$$zf_{ip} \geq zf_{ip-1} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.6)$$

Les contraintes (4.1) à (4.3) assurent que les variables binaires zs_{ip} valent 1 si le lot i commence avant ou durant la période p et 0 sinon (Figure 4-1). Le même mécanisme s'applique aux dates de fin des lots tf_i et les variables binaires zf_{ip} dans les contraintes (4.4) à (4.6).

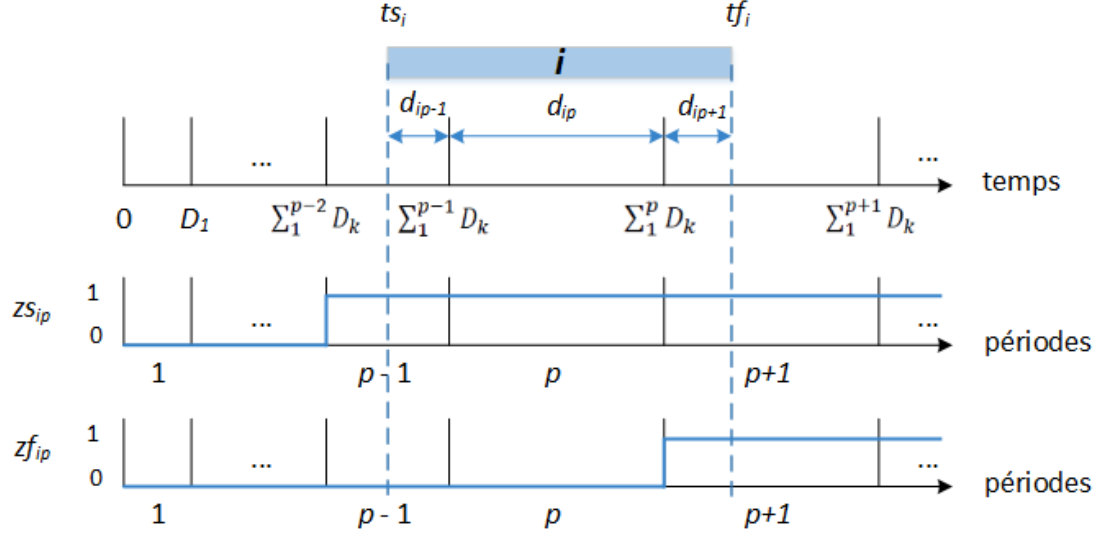


Figure 4-1: Positionnement des dates et durées vs. périodes et variables associées

4.2.2 Contraintes déterminant les durées des lots dans les périodes

Les durées des lots de travaux dans les périodes d_{ip} permettent de faire le passage des dates de début et de fin à une vision par période. La durée d_{ip} représente la plage de temps commune entre le lot i et la période p et est définie à l'aide des variables binaires qui situent la date de début et de fin du lot i par rapport aux périodes. Ainsi, cette durée est supérieure à 0 uniquement pour les périodes p vérifiant : $zs_{ip} - zf_{ip-1} = 1$ (Figure 4-1). Il existe six configurations possibles du positionnement d'un lot i par rapport à une période p (Figure 4-2). Les contraintes suivantes permettent de définir pour chacune de ces configurations la durée d_{ip} :

$$d_{ip} \leq D_p * (zs_{ip} - zf_{ip-1}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.7)$$

$$d_{ip} \geq D_p * (zs_{ip-1} - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.8)$$

$$d_{ip} \geq tf_i - \sum_{k=1}^p D_k + D_p * zs_{ip-1} - H * (1 - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.9)$$

$$d_{ip} \geq \sum_{k=1}^p D_k * (1 - z_{s_{ip-1}}) - ts_i - D_p * z_{f_{ip}} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.10)$$

$$\sum_{p \in P} d_{ip} = tf_i - ts_i \quad \forall i \in I \quad (4.11)$$

Les contraintes (4.7) forcent d_{ip} à 0 si le lot i est inactif durant la période p (configurations (a) et (c)) et assurent que d_{ip} ne dépasse pas la durée D_p de la période p pour les autres configurations.

Les contraintes (4.8) forcent avec les contraintes (4.7) la durée d_{ip} à être égale à D_p pour la configuration (d), c.à.d. quand le lot i commence avant la période p et n'est pas encore achevé à la fin de la période p .

Les contraintes (4.9) et (4.10) donnent une borne inférieure à d_{ip} pour les configurations (e) et (f) respectivement, c.à.d. quand le lot i finit/commence dans la période p .

Finalement, les contraintes (4.11) assurent la cohérence globale des durées dans les périodes avec les dates de début et de fin.

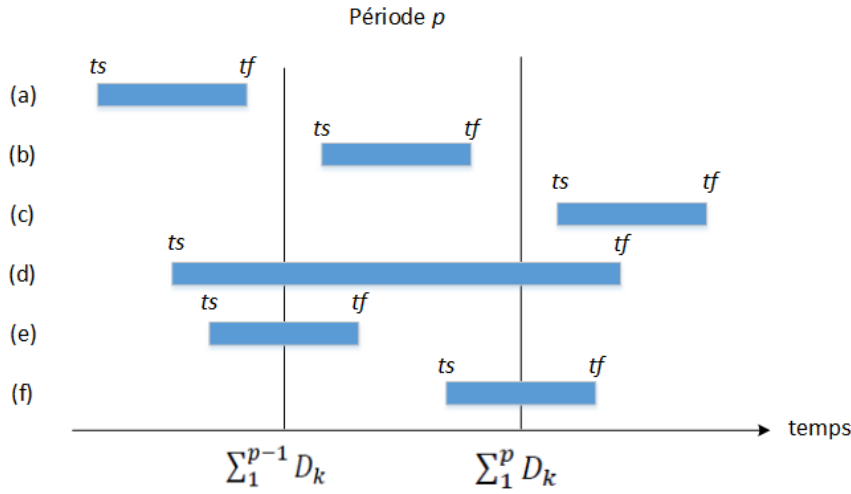


Figure 4-2: Les six configurations possibles d'un lot et d'une période

4.2.3 Contraintes de temps et de séquence

Chaque lot de travail a sa date de lancement, avant laquelle il ne peut pas s'exécuter (contraintes (4.12)). Ces dates sont souvent déterminées par des facteurs externes comme le besoin d'autorisations locales, l'exigence de posséder des certificats avant de commencer des lots ou les contraintes climatiques.

$$ts_i \geq RD_i \quad \forall i \in I \quad (4.12)$$

Les contraintes (4.13) assurent le respect des liens de précédence. $Cmax$ représente la date de fin du projet. Les contraintes (4.14) assurent que tous les lots sont finis avant la fin du projet.

$$ts_i \geq tf_j \quad \forall i \in I, j \in Pred_i \quad (4.13)$$

$$Cmax \geq tf_i \quad \forall i \in I \quad (4.14)$$

4.2.4 Contraintes de charge et de capacité

Ces contraintes permettent de répartir les charges requises des lots de travail sur les différentes périodes. L'intensité x_{ip} représente le pourcentage de la charge du lot i allouée dans la période p . Les contraintes (4.15) assurent que la charge allouée à un lot de travail durant une période ne dépasse pas la quantité maximale de la charge permise pour ce dernier qui est proportionnelle à la durée accordée au lot dans cette période. Cette borne maximale correspond à la charge maximale globale tous groupes de ressources confondus. Cependant, cette charge maximale peut être imposée par un seul groupe de ressources. En effet, étant donné l'hypothèse que la proportionnalité dans l'utilisation des groupes de ressources est constante durant l'exécution des lots (voir section 4.1), la charge maximale par rapport à un groupe de ressources donné va impliquer des charges maximales par rapport aux autres groupes de ressources requis par le lot en question. Suivant le même principe, les contraintes (4.16) assurent le respect de la borne minimale de la charge durant l'exécution d'un lot. Notons que la préemption est possible dans le cas où Q_i^{min} est nulle. C'est-à-dire que le lot peut être interrompu durant son exécution.

Les contraintes (4.17) assurent le respect des charges totales requises par les lots. Les contraintes (4.18) assurent que l'utilisation interne et externe globale d'une ressource dans une période correspond à la somme des consommations des lots en cours d'exécution sur cette période de cette ressource. L'utilisation externe d'une ressource dans une période correspond à la capacité non-régulière de cette ressource requise dans cette période. Les contraintes (4.19) assurent que l'utilisation interne des ressources dans une période ne dépasse pas la capacité interne disponible. La contrainte (4.20) définit la variable de coût de projet comme étant le coût global d'utilisation des ressources non-régulières de tous les groupes de ressources sur toutes les périodes.

$$x_{ip} \cdot \sum_{r \in R} Q_{ri} \leq Q_i^{\max} \cdot d_{ip} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.15)$$

$$x_{ip} \cdot \sum_{r \in R} Q_{ri} \geq Q_i^{\min} \cdot d_{ip} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.16)$$

$$\sum_{p \in P} x_{ip} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.17)$$

$$y_{int}_{rp} + y_{ext}_{rp} = \sum_{i \in I} x_{ip} \cdot Q_{ri} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (4.18)$$

$$y_{int}_{rp} \leq K_{rp} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (4.19)$$

$$coût = \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} C_{rp} * y_{ext}_{rp} \quad (4.20)$$

4.2.5 Domaines de définition des variables

Ces contraintes expriment simplement les domaines de définition des variables.

$$z_{s_{ip}}, z_{f_{ip}} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4.21)$$

$$\text{toutes les variables} \geq 0 \quad (4.22)$$

4.2.6 Fonction-objectif

Time-driven RCCP

Dans le *Time-driven RCCP*, une date limite est fixée pour le projet et l'objectif du modèle est de minimiser le coût de la capacité non régulière (4.23).

$$\text{Minimiser } coût \quad (4.23)$$

Resource-driven RCCP

Dans le *Resource-driven RCCP*, il n'y a pas de recours à la capacité non régulière et l'objectif du modèle est de minimiser la durée du projet (4.24). Les variables *yext* sont donc éliminées du modèle ou simplement forcées à être nulles.

$$\text{Minimiser } C_{max} \quad (4.24)$$

4.3 Génération d'instances

4.3.1 Problème *time-driven* RCCP

Les instances de projet test utilisées pour la variante *time-driven* du problème RCCP sont basées sur les instances de benchmark de De Boer [1998] qui sont de référence pour ce problème dans la littérature. L'auteur se base sur la procédure de construction de réseau développée par Kolisch et al. [1995]. Les instances sont subdivisées en classes, chacune est caractérisée par une combinaison différente des paramètres suivants : le nombre de lots de travaux N , le nombre de groupes de ressources K et la marge moyenne S . Cependant, dans nos instances, ce dernier paramètre n'est pas considéré, car son calcul est basé sur les dates d'échéance des lots que nous ne considérons pas prédéfinies à ce niveau de planification. Les paramètres N et K peuvent prendre trois valeurs chacun : $N = 10, 20$ ou 50 et $K = 3, 10$ ou 20 . Nous obtenons donc 9 classes. De Boer génère 50 instances pour chaque classe, ce qui donne un total de 450 instances. Les instances de benchmark sont proposées pour un horizon découpé en périodes égales de durée 1 (semaine). Pour notre modèle à durées variables de périodes, nous découpons l'horizon comme suit. Les quatre premières périodes sont considérées détaillées et de durée 1 et le reste des périodes a une durée égale à 4. Dans le cas où l'horizon n'est pas un multiple de 4, la durée de la cinquième période correspond au reste de la division euclidienne de l'horizon par quatre. Les capacités régulières sont adaptées en conséquence. Ainsi, les capacités des périodes agrégées sont obtenues en sommant les capacités des périodes détaillées correspondantes dans les instances de benchmark. Nous avons également introduit les paramètres de charge maximale Q_i^{max} et de charge minimale Q_i^{min} . Q_i^{max} est exprimé simplement en fonction de la durée minimale du lot i définie dans les instances de benchmark : $Q_i^{max} = \sum_{r \in R} Q_{ri} / Dmin_i$. Q_i^{min} est fixée à 0, c'est-à-dire qu'on autorise la préemption.

4.3.2 Problème *resource-driven* RCCP

Pour cette variante du problème, d'autres paramètres ont dû être modifiés par rapport aux instances de benchmark de De Boer [1998] afin de respecter la contrainte de rigidité des ressources. Ces paramètres sont les charges requises Q_{ri} par les lots i des groupes de ressources r , les charges maximales Q_i^{max} , ainsi que les capacités des ressources régulières sur les périodes

détaillées K_l . L'indice $l \in \{1, \dots, H\}$ réfère aux périodes détaillées de durée 1, à ne pas confondre avec les périodes à durées variables $p \in P$.

Nous commençons par générer la charge maximale Q_{ri}^{max} d'un groupe de ressources r qui peut être assignée au lot i durant une période détaillée l , en la générant selon la loi uniforme discrète de l'intervalle $[1, 20]$. À noter que nous générons uniquement les charges maximales des groupes de ressources que le lot i utilise selon les instances de De Boer [1998]. Pour les autres groupes de ressources, la charge maximale est nulle. Nous déduisons par la suite la charge maximale du lot i (toutes ressources confondues) sur une période détaillée : $Q_i^{max} = \sum_{r \in R} Q_{ri}^{max}$. La charge de travail requise du groupe de ressources r par le lot i est calculée ainsi : $Q_{ri} = Dmin_i * Q_{ri}^{max}$. $Dmin_i$ est la durée minimale du lot de travail i .

Ensuite, afin de générer des capacités de ressources qui assurent l'existence d'une solution réalisable, nous commençons par construire une solution sans considérer les contraintes de ressources qui est lissée sur tout l'horizon du projet H avec le minimum de marge totale pour chaque lot (différence entre la date de fin au plus tard et la date de fin au plus tôt du lot). Ainsi, cette solution nous procure des durées allongées des lots à partir desquelles nous définissons les utilisations périodiques des ressources en considérant une utilisation uniforme tout au long de l'exécution de chaque lot. Les capacités sont déterminées à partir de ces utilisations périodiques de ressources. L'algorithme de construction de la solution réalisable est résumé dans la Figure 4-3. Les notations utilisées sont résumées dans le Tableau 4-2.

Comme le montre la Figure 4-3, nous commençons par générer une solution avec les durées minimales des lots. Ensuite, nous augmentons itérativement les durées des lots par une fraction de leur marge totale : $MT_i/Lmax$. Diviser par la longueur (en termes de nombre de lots) du chemin composé du plus grand nombre de lots permet de s'assurer de ne pas dépasser l'horizon. Le critère d'arrêt est quand les marges totales de tous les lots sont inférieures à 0.005 ou quand le nombre d'itérations atteint 100. Comme résultat de cet algorithme, la différence maximale sur toutes les instances de test entre la date de fin du projet dans la solution générée et l'horizon H est de $7.1E-15$. Les solutions construites avec l'algorithme sont donc bien lissées sur l'horizon.

Tableau 4-2: Notations

Paramètre de la solution	Description
ES_i, EF_i	Dates de début et de fin au plus tôt du lot de travail i
LS_i, LF_i	Dates de début et de fin au plus tard du lot de travail i
MT_i	Marge totale du lot de travail i
d_{il}	Durée du lot i sur la période l
d_i	Durée totale du lot i
$Lmax$	Le plus grand nombre de lots sur un chemin

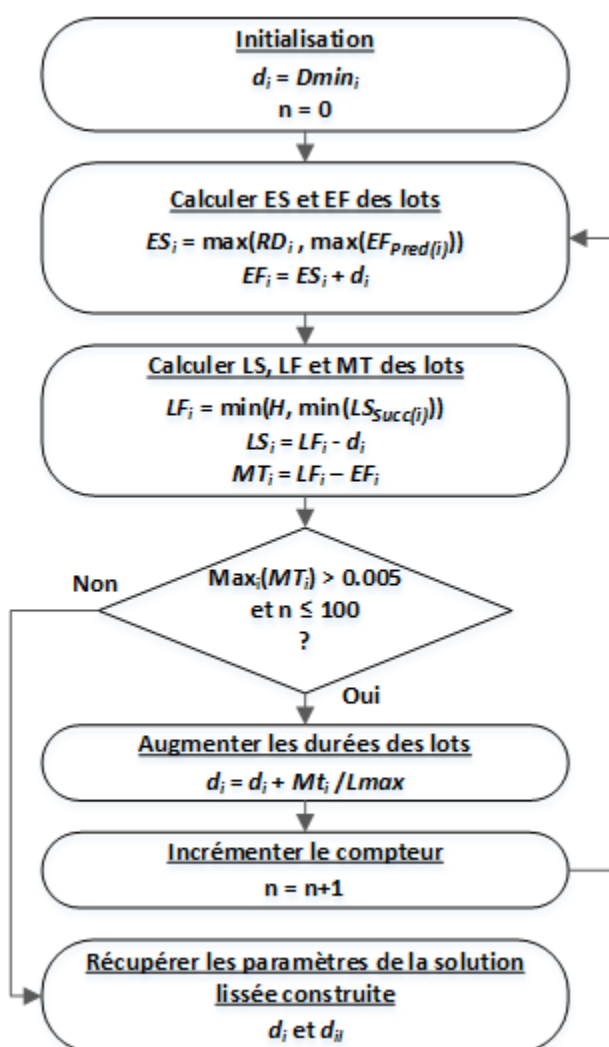


Figure 4-3: Construction d'une solution réalisable

Une fois la solution lissée sur l'horizon est construite, nous calculons l'utilisation périodique des ressources U_{rl} de chaque groupe de ressources r dans la solution obtenue, considérant une utilisation uniforme des ressources par les lots :

$$U_{rl} = \sum_{i \in I} ((Q_{ri} * d_{il}) / d_i).$$

La capacité K_{rl} du groupe de ressources r sur la période l est calculée comme suit :

$$K_{rl} = \max_l U_{rl}.$$

Les valeurs de U_{rl} sont arrondies au nombre entier supérieur le plus proche. Sans perte de généralité, nous supposons que les capacités de ressources ne varient pas d'une période à l'autre. L'indice l référant à la période est conservé dans la notation des capacités K_{rl} pour cette variante *resource-driven* du problème RCCP uniquement pour garder le caractère général et conserver les mêmes notations utilisées dans les instances de la variante *time-driven* RCCP où les capacités des groupes de ressources changent d'une période à l'autre. Cette procédure de génération des capacités garantit l'existence d'une solution faisable pour chaque instance de projet test. La même approche d'agrégation des périodes et de regroupement des capacités correspondantes est reprise pour cette deuxième variante du problème RCCP.

4.4 Expérimentation pour le problème *resource-driven* RCCP

Dans cette section, nous comparons les résultats expérimentaux du modèle *resource-driven* RCCP à durées variables des périodes présenté ci-haut au modèle RCCP désagrégé où les périodes sont gardées détaillées à durée 1 avec des estimations de capacités de ressources considérées certaines et conformes à la réalité. Les deux modèles sont nommés comme suit :

Ag : Modèle *resource-driven* RCCP à durées variables des périodes où les 4 premières périodes sont détaillées, de durée 1 et le reste des périodes est agrégé, de durée 4.

Desg : Modèle *resource-driven* RCCP désagrégé où toutes les périodes sont détaillées, de durée 1.

Nous analysons d'abord les temps de calcul. Les tests ont été effectués sur une grille de calcul comportant 26 PCs avec des processeurs 3.07 GHz Intel(R) Xeon(R) X5675 sous Linux, en utilisant le solveur IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.0.1 avec une limite de temps

imposée de 5000 secondes. Le Tableau 4-3 montre pour les deux modèles le temps CPU moyen à l'optimalité sur les instances atteignant l'optimalité et le temps CPU moyen sur toutes les instances (la limite de temps de 5000 secondes est utilisée pour les instances qui n'atteignent pas l'optimalité). Inst* désigne le groupe d'instances où le modèle Desg atteint l'optimalité. Ces résultats montrent le gain de temps de calcul considérable généré par l'agrégation des périodes. Ceci montre l'intérêt de l'agrégation dans la réduction de l'effort de planification.

Tableau 4-3: Temps de calcul (en secondes)

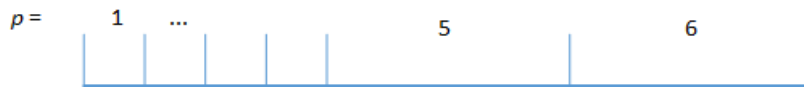
	Modèle Ag	Modèle Desg
Temps CPU moyen à l'optimalité	0.86 (0.29 sur Inst*)	14.25
Temps CPU moyen	0.86	80.72

À présent, nous allons analyser l'impact de l'incertitude liée à l'agrégation ainsi que l'incertitude liée aux charges de travail sur la performance et robustesse de la qualité des échéanciers développés avec le modèle RCCP à durées variables : Ag. Pour ce faire nous allons appliquer le processus expérimental décrit dans la section 3.3.2 aux modèles Ag et Desg. Pour le modèle Ag, nous appliquons à chaque nouveau point de décision le même mécanisme de découpage des périodes. Ainsi comme l'illustre l'exemple sur la Figure 4-4, les premières périodes sont considérées détaillées avec des estimations certaines des capacités et le reste des périodes est agrégé avec des estimations grossières des capacités. De cette façon, nous reproduisons le déploiement progressif des incertitudes liées à l'agrégation des capacités.

La même grille de calcul citée plus haut est utilisée. L'approche réactive a été codée sur Matlab R2014a interfacé avec CPLEX Optimization Studio 12.6.1.0 à travers l'utilisation de l'API de classe CPLEX. Ainsi l'algorithme de simulation entre deux points successifs de décision est réalisé sur Matlab et les ré-optimisations aux points de décision sont résolues avec le solveur CPLEX. La limite de temps des résolutions CPLEX a été établie cette fois à 1000 secondes (incluant la résolution CPLEX pour générer l'échéancier de référence à $t = 0$).



a: Décomposition de l'horizon de temps dans le réseau original utilisé pour le modèle Desg



b: Décomposition de l'horizon de temps dans le réseau original utilisé pour le modèle Ag



c: Décomposition de l'horizon de temps dans le réseau modifié utilisé pour le modèle Ag au point de décision $t = 1$

Figure 4-4: Illustration de la mise à jour du vecteur des durées des périodes

Deux niveaux de variabilité des charges sont considérés : $\pm 50\%$ et $\pm 20\%$. Pour chaque instance test et niveau de variabilité, 500 scénarios de projet sont générés en se basant sur les lois triangulaires des charges de travail. À noter que la proportionnalité dans l'utilisation des groupes de ressources par les lots est conservée durant les simulations. Par exemple, une augmentation de 20% de la charge de travail d'un lot se traduit par une augmentation de 20% des charges requises de tous les groupes de ressources qu'elle est sensée utiliser. Nous avons également augmenté l'horizon de 50%, étant donné que l'horizon initial peut s'avérer insuffisant pour programmer les lots de travaux dont la charge réelle est supérieure à celle estimée au départ.

Nous utilisons les acronymes rf et rl pour référer respectivement à l'échéancier de référence et l'échéancier réalisé et l'acronyme moy pour désigner la moyenne sur tous les scénarios de projet simulés. Trois mesures sont utilisées pour évaluer l'impact des incertitudes :

$$E0(Cmax\%) = (Cmax_{Ag}^{rf} - Cmax_{Desg}^{rf}) / Cmax_{Desg}^{rf}$$

$$E(Cmax\%) = moy[(Cmax_X^{rl} - Cmax_X^{rf}) / Cmax_X^{rf}]$$

$$E1(Cmax\%) = moy[(Cmax_{Ag}^{rl} - Cmax_{Desg}^{rl}) / Cmax_{Desg}^{rl}]$$

La première mesure permet de comparer les durées de projet estimées dans l'échéancier de référence avec le modèle Ag via le modèle Desg.

La deuxième mesure permet de mesurer la robustesse de la qualité de l'échéancier en calculant, pour chaque modèle $X = \text{Ag}$ ou Desg , l'écart moyen entre la durée réalisée et la durée estimée dans l'échéancier de référence. La mesure $E(Cmax\%)$ est nommée la fonction de dépassement de durée et correspond à l'opposé de la fonction de robustesse.

Finalement, la troisième mesure compare les durées de projet dans l'échéancier réalisé en appliquant les deux modèles.

La Figure 4-5 montre que la durée estimée de projet avec le modèle agrégé Ag est similaire ou plus optimiste dans 100% des cas que la durée estimée par le modèle désagrégé Desg. Dans 36.9% des instances, l'estimation est similaire dans les deux modèles.

Afin d'illustrer l'effet de l'agrégation sur les estimations de la durée du projet, la Figure 4-6 montre les échéanciers de référence générés par les modèles Ag et Desg d'une instance de projet test. L'instance de projet illustrée est caractérisée par 10 lots de travaux et 10 groupes de ressources. L'acronyme WP réfère à *Work Package* qui correspond à lot de travail. La figure montre également le profil d'utilisation d'un groupe de ressources parmi les 10 groupes de ressources utilisés. Nous constatons que l'agrégation des périodes a conduit à une estimation plus optimiste de la durée du projet. Plusieurs lots de travaux ont une durée plus réduite dans l'échéancier agrégé comparativement à l'échéancier désagrégé. En effet, la considération des contraintes de capacité de façon globale sur des périodes plus agrégées procure une plus grande flexibilité.

La Figure 4-7 analyse les valeurs de la fonction de dépassement de durée pour les deux modèles. Nous constatons qu'avec le modèle Desg, 100% des instances ont une variation dans la durée de projet inférieure à 20% en comparaison à 87.5% des instances pour le modèle Ag. 65.8% des instances ont une variation inférieure à 10% pour le modèle Ag en comparaison à 95.6% pour le modèle Desg. Cette comparaison permet de relever l'effet négatif de l'incertitude liée à l'agrégation sur la robustesse de la qualité de l'échéancier, puisque ce type d'incertitude est absent dans le modèle désagrégé Desg.

La Figure 4-8 montre d'un autre côté que l'incertitude liée à l'agrégation n'a pas un effet notable sur la performance finale du projet. En effet, pour 97.3% des instances, l'écart entre les durées réalisées avec les deux modèles est situé dans l'intervalle $[-5\% \ 5\%]$.

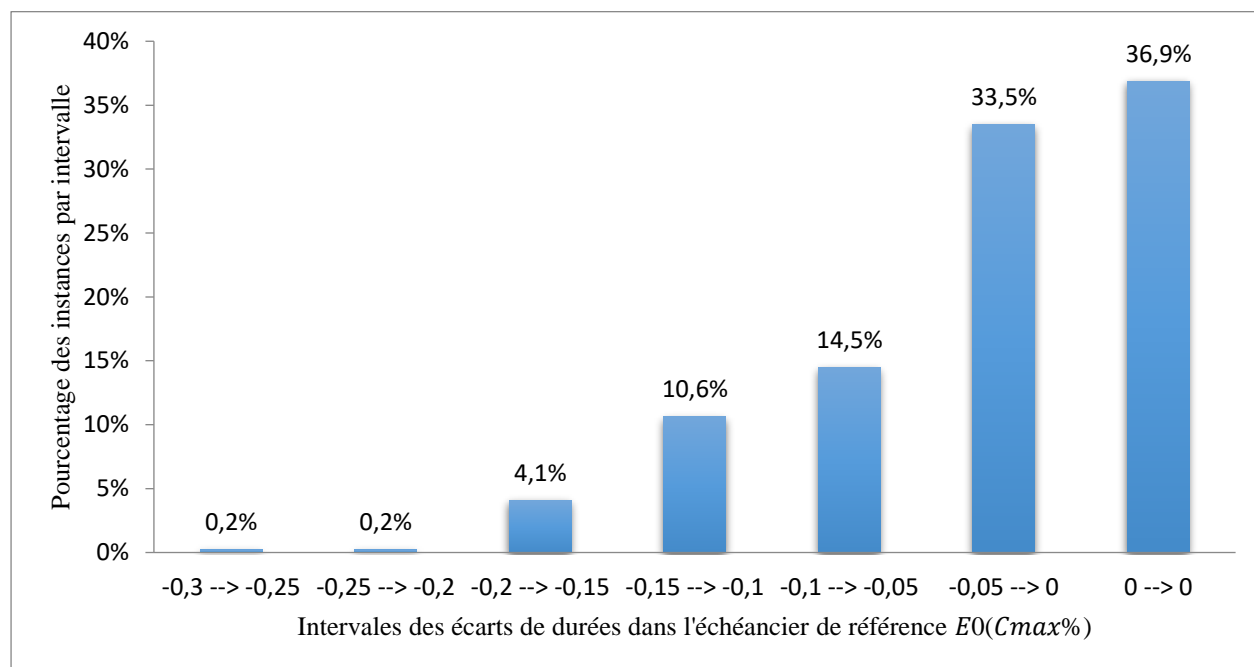


Figure 4-5: Répartition des instances basée sur les écarts de durées dans l'échéancier de référence

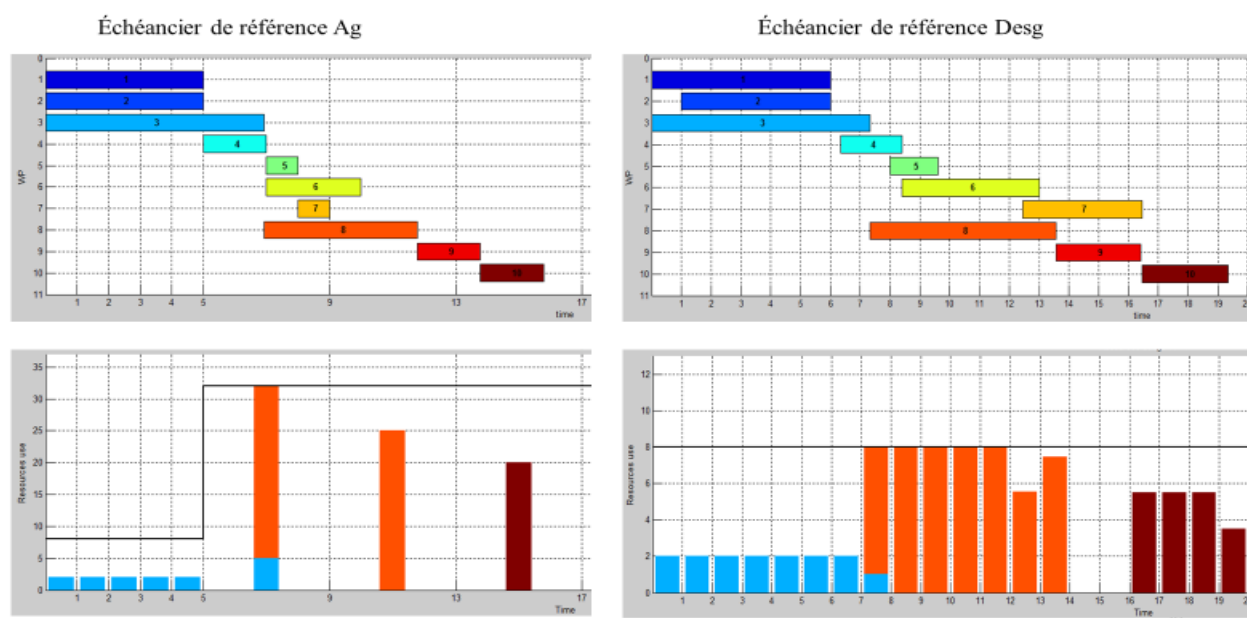


Figure 4-6: Exemple d'échéanciers de référence d'une instance de projet test

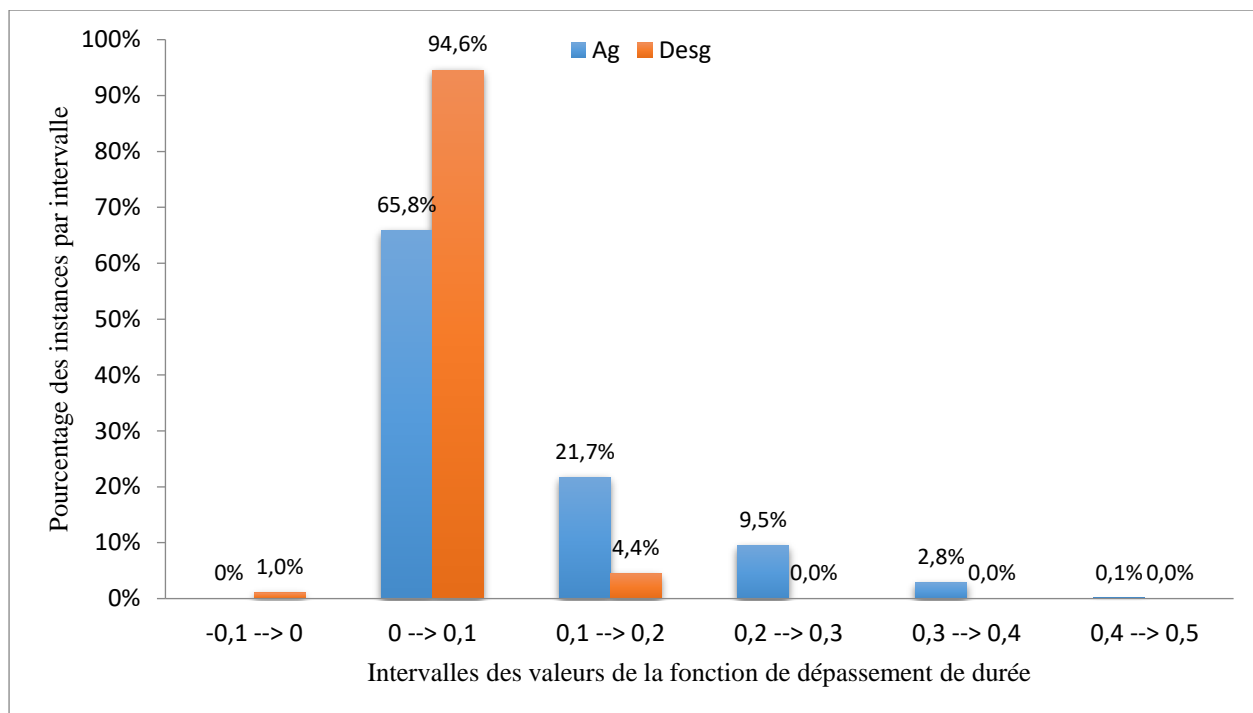


Figure 4-7: Répartition des instances basée sur la valeur de la fonction de dépassement de durée pour les modèles Ag et Desg

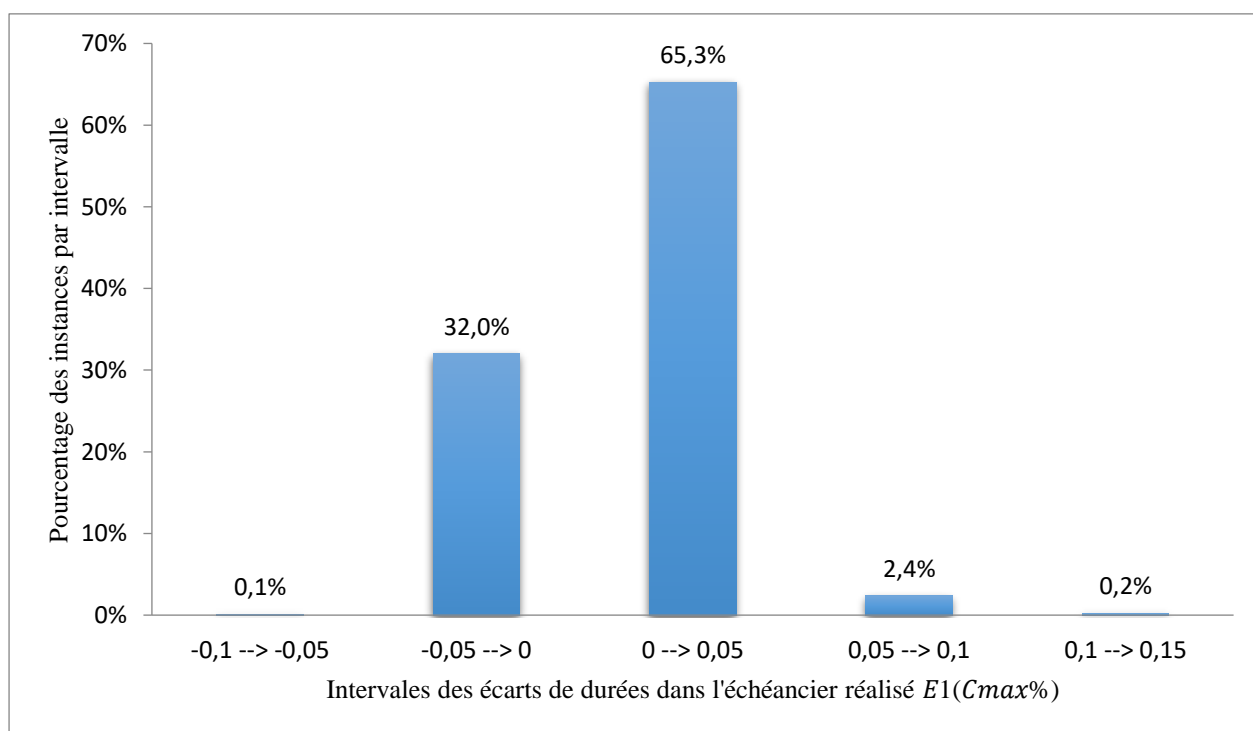


Figure 4-8: Répartition des instances basée sur les écarts de durées dans l'échéancier réalisé

4.4.1 Analyse par classe d'instances

Dans cette section, nous réalisons une analyse détaillée par classe d'instance afin de mesurer l'influence des paramètres N et K sur la robustesse et performance du modèle Ag via Desg. Rappelons que N réfère au nombre de lots de travaux et K au nombre de groupes de ressources. L'analyse des résultats du modèle Desg permet de mesurer l'effet séparé de l'incertitude liée aux charges de travail puisque l'autre type d'incertitude (d'agrégation) y est absent. D'un autre côté, comparer les résultats du modèle Ag et Desg par classe d'instances permet de mesurer l'effet de l'incertitude liée à l'agrégation selon les paramètres du projet. Le Tableau 4-4 montre les résultats de l'analyse de sensibilité de la valeur de la fonction de dépassement de durée $E(Cmax\%)$ en fonction des paramètres N et K pour les deux modèles. En analysant les résultats du modèle désagrégé Desg, nous constatons que l'incertitude dans les charges de travail est plus influente sur la robustesse de la qualité de l'échéancier de référence pour les grandes instances. En effet, $E(Cmax\%) = 2.7\%$ pour la classe ($N = 10, K = 3$), $E(Cmax\%) = 3.7\%$ pour la classe ($N = 20, K = 10$) et $E(Cmax\%) = 5.5\%$ pour la classe ($N = 50, K = 20$). D'un autre côté, nous remarquons que chacun des deux paramètres N et K est plus influent sur la robustesse quand l'autre paramètre est petit.

En analysant les résultats du modèle Ag et les comparant au modèle Desg, nous constatons que l'incertitude liée à l'agrégation est plus influente sur la robustesse de la qualité de l'échéancier de référence quand N est plus petit et K plus grand. Ainsi, la différence entre la robustesse des deux modèles est la plus grande pour la classe d'instances ($N = 10, K = 20$) avec une valeur de 17.7% pour le modèle Ag via 5.3% pour le modèle Desg. Dans l'autre extrémité ($N = 50, K = 3$), nous remarquons à l'opposé que le modèle Ag ($E(Cmax\%) = 4.8\%$) se comporte mieux que le modèle Desg ($E(Cmax\%) = 5.2\%$).

La Figure 4-9 montre de façon plus simplifiée et visuelle les influences des deux types d'incertitudes sur la robustesse de la qualité de l'échéancier en fonction des paramètres N et K . L'impact augmente dans le sens de la flèche et également avec l'augmentation de l'intensité de la couleur de la flèche.

Le Tableau 4-5 analyse les écarts entre les deux modèles dans les durées estimées dans l'échéancier de référence et réalisées dans les échéanciers réalisés selon la variation des

paramètres K et N . Ces écarts permettent d'analyser l'impact de l'incertitude liée à l'agrégation sur les estimations initiales ainsi que sur la performance finale du projet. Nous remarquons que l'impact de cette incertitude sur les estimations initiales ainsi que sur la robustesse (Tableau 4-4) varie de la même façon avec les paramètres N et K . Ainsi, pour la classe d'instances ($N = 10$, $K = 20$), cette incertitude a le plus d'impact sur les durées prévues ($E0(Cmax\%) = -9.1\%$) alors qu'à l'autre extrémité, c.à.d. pour la classe ($N = 50$, $K = 3$) elle n'a aucun impact sur les durées prévues ($E0(Cmax\%) = 0,0\%$).

D'un autre côté, nous constatons que l'incertitude liée à l'agrégation n'a pas un impact significatif sur la performance finale du projet quels que soient les valeurs des paramètres N et K .

La Figure 4-10 illustre de façon plus simplifiée et sans échelle l'impact des deux types d'incertitudes selon les paramètres de projet N et K .

Tableau 4-4: Analyse de l'impact des paramètres de l'instance sur la fonction de dépassement de durée des deux modèles

	Moyenne $\forall K$	$K = 3$	$K = 10$	$K = 20$
$N = 10$				
Desg	3.9%	2.7%	3.6%	5.3%
Ag	13.0%	7,0%	14.4%	17.7%
$N = 20$				
Desg	4.3%	3.8%	3.7%	5.3%
Ag	10.1%	5.5%	10,0%	14.7%
$N = 50$				
Desg	5.3%	5.2%	5.1%	5.5%
Ag	6.1%	4.8%	5.6%	8.1%
Moyenne $\forall N$				
Desg		3.9%	4.1%	5.4%
Ag		5.8%	10.2%	13.6%

Tableau 4-5: Analyse de l'influence des paramètres de l'instance sur les écarts des durées estimées et réalisées par les deux modèles

	Moyenne $\forall K$	$K = 3$	$K = 10$	$K = 20$
$N = 10$				
$E0(Cmax\%)$	-6.8%	-3.5%	-7.9%	-9.1%
$E1(Cmax\%)$	0.9%	0.4%	1.3%	1.1%
$N = 20$				
$E0(Cmax\%)$	-3.8%	-1.3%	-4.2%	-6.1%
$E1(Cmax\%)$	1.2%	0.4%	1.4%	1.9%
$N = 50$				
$E0(Cmax\%)$	-0.6%	0,0%	-0.3%	-1.6%
$E1(Cmax\%)$	0.2%	-0.4%	0.2%	0.7%
Moyenne $\forall N$				
$E0(Cmax\%)$		-1.6%	-4.3%	-5.7%
$E1(Cmax\%)$		0.1%	1,0%	1.2%

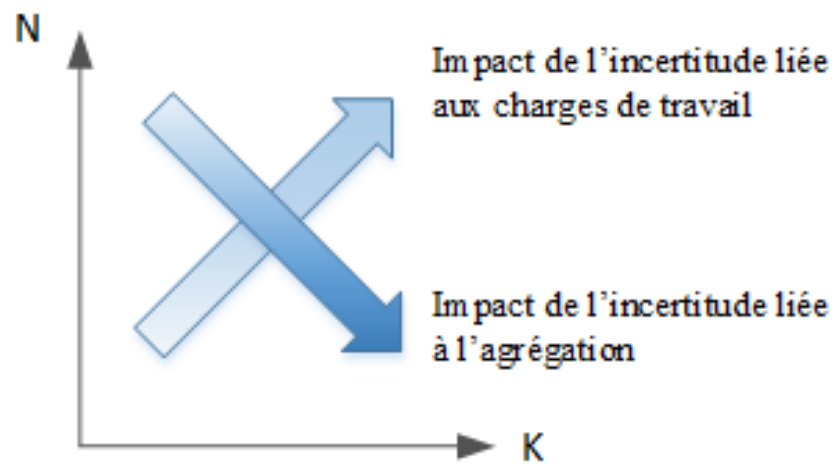


Figure 4-9: Impact des incertitudes sur la robustesse en fonction des paramètres N et K

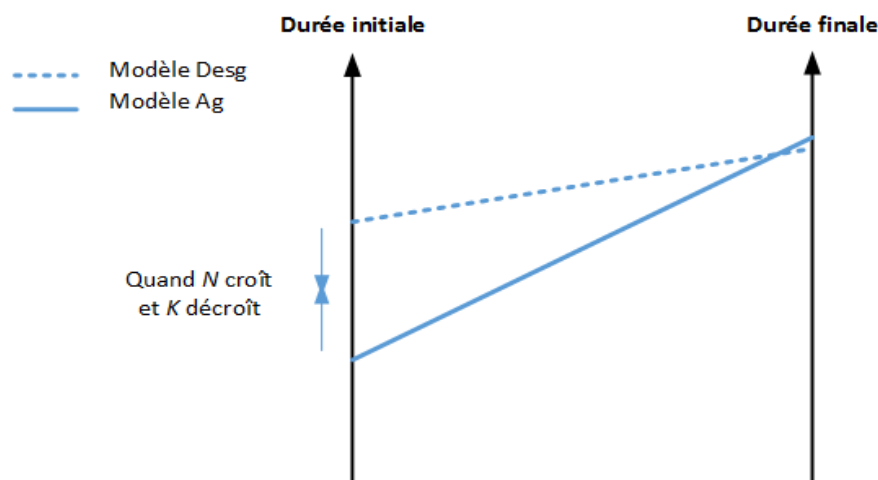


Figure 4-10: Comparaison de la robustesse et performance des deux modèles en fonction des paramètres N et K

4.4.2 Impact du niveau de variabilité des charges de travail sur les résultats

Le Tableau 4-6 rapporte les résultats moyens sur l'ensemble des instances test pour chacun des deux niveaux de variabilité des charges de travail. Nous constatons que l'augmentation dans le niveau de variabilité des charges affecte négativement la robustesse des échéanciers de référence. En effet, la même constatation est relevée avec l'existence de l'incertitude liée à l'agrégation (modèle Ag) et son absence (modèle Desg). D'un autre côté, l'augmentation dans le niveau de variabilité des charges de travail semble réduire légèrement les écarts entre les durées réalisées des deux modèles. Ajouter un autre niveau de variabilité pourrait confirmer cette constatation.

Tableau 4-6: Analyse de sensibilité en fonction du niveau de variabilité des charges de travail

Niveau de variabilité	Var. = $\pm 20\%$	Var. = $\pm 50\%$
$E(C_{max}\%)$ (Desg)	2.3%	6.6%
$E(C_{max}\%)$ (Ag)	7.9%	11.7%
$E1(C_{max}\%)$	1.1%	0.5%

4.4.3 Nombre de réplifications nécessaire

Le Tableau 4-7 montre le coefficient de variation de la durée de projet réalisée moyenne selon le nombre de réplifications (nombre de scénarios de projet simulés) pour les deux modèles et les deux niveaux de variabilité des charges de travail. Nous nous sommes arrêtés à 500 réplifications, car le

coefficient de variation s'améliore peu en passant de 400 à 500 réplifications et que ce niveau de précision est suffisant pour les résultats de notre problème. D'ailleurs, on aurait pu se contenter d'un nombre de réplifications moindre puisque les mêmes scénarios sont générés pour les deux modèles comparés Ag et Desg.

Tableau 4-7: Coefficient de variation selon le nombre de réplifications

Nombre de réplifications	Ag		Desg	
	Var. = $\pm 20\%$	Var. = $\pm 50\%$	Var. = $\pm 20\%$	Var. = $\pm 50\%$
100	0.44%	0.94%	0.41%	0.92%
200	0.34%	0.73%	0.32%	0.72%
300	0.30%	0.63%	0.27%	0.62%
400	0.26%	0.57%	0.24%	0.56%
500	0.24%	0.52%	0.22%	0.51%

4.5 Expérimentation pour le problème *time-driven* RCCP

Dans cette section, nous allons étudier la variante *time-driven* du problème RCCP. Ainsi, comme pour la variante *resource-driven*, le modèle RCCP à durées variables des périodes sera comparé au modèle RCCP désagrégé où toutes les périodes sont de durée 1. Les deux modèles sont nommés comme suit :

Ag2 : Modèle *time-driven* RCCP à durées variables des périodes où les 4 premières périodes sont détaillées, de durée 1, et le reste des périodes est agrégé, de durée 4.

Desg2 : Modèle *time-driven* RCCP désagrégé où toutes les périodes sont détaillées, de durées 1.

Nous analysons d'abord les temps de calcul. Les tests ont été effectués sur la même grille de calcul sous Linux, en utilisant le solveur IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.1.0. Pour les instances n'atteignant pas l'optimalité, une limite de temps de 50000 secondes a été imposée. Le Tableau 4-8 montre pour les deux modèles le temps CPU moyen sur les instances atteignant l'optimalité et le temps CPU moyen sur toutes les instances. Inst* désigne le groupe d'instances où le modèle Desg2 atteint l'optimalité. Nous constatons que le modèle agrégé a des temps de calcul significativement meilleurs que ceux du modèle désagrégé dû au nombre réduit de

périodes qui implique une diminution significative du nombre de variables et contraintes. Ceci confirme l'intérêt de l'agrégation dans la réduction de l'effort de planification.

Tableau 4-8: Temps de calcul (en secondes)

	Modèle Ag2	Modèle Desg2
Temps CPU moyen à l'optimalité	622.7 (8.5 sur Inst*)	2130.9
Temps CPU moyen	2597.8	12662.2

À présent, nous allons analyser l'impact des incertitudes sur la performance et la robustesse de la qualité des échéanciers développés avec le modèle *time-driven* RCCP à durées variables : Ag2. Pour ce faire, nous allons appliquer aux modèles Ag2 et Desg2 le même processus expérimental utilisé pour le *resource-driven* RCCP basé sur l'approche réactive à horizon roulant à quelques différences près :

- 100 scénarios de projet sont générés pour chaque instance test et chaque modèle. Moins de scénarios sont simulés dans le *time-driven* RCCP, car les temps de résolution de ce dernier sont plus importants que ceux du *resource-driven* RCCP. Aussi, comme mentionnés précédemment, les mêmes scénarios sont générés pour les modèles Ag2 et Desg2. La comparaison entre les deux modèles est donc valide.
- Le niveau de variabilité dans les charges de travail est établi à $\pm 10\%$. Ce niveau est plus réaliste comparé au niveau de variabilité de $\pm 50\%$ considéré dans le *resource-driven* RCCP. En effet, ce niveau de variation est rarement atteint en pratique. Nous allons toutefois faire varier ce paramètre pour un sous-groupe d'instances (voir section 4.5.2).
- L'horizon a été augmenté de 20% pour couvrir les cas où l'horizon initial s'avère insuffisant pour programmer tous les lots de travaux avec leurs charges réelles. Un terme qui pénalise fortement le dépassement de l'horizon initial a été toutefois ajouté à la fonction-objectif. Ce terme n'était pas nécessaire pour le *resource-driven* RCCP puisqu'on cherchait à minimiser la durée du projet.

Trois mesures sont utilisées pour évaluer l'impact des incertitudes :

$$E0(\text{coût}\%) = (\text{coût}_{Ag2}^{rf} - \text{coût}_{Desg2}^{rf}) / \text{coût}_{Desg2}^{rf}$$

$$E(\text{coût}\%) = \text{moy}[(\text{coût}_X^{rl} - \text{coût}_X^{rf})/\text{coût}_X^{rf}]$$

$$E1(\text{coût}\%) = \text{moy}[(\text{coût}_{Ag2}^{rl} - \text{coût}_{Desg2}^{rl})/\text{coût}_{Desg2}^{rl}]$$

De même que pour le problème *resource-driven* RCCP, les acronymes *rf* et *rl* réfèrent respectivement à l'échéancier de référence et l'échéancier réalisé et l'acronyme *moy* à la moyenne sur tous les scénarios de projet simulés. La première mesure compare les coûts estimés par les deux modèles Ag2 et Desg2 dans l'échéancier de référence. La deuxième mesure permet de calculer la robustesse de la qualité de l'échéancier en comparant le coût réalisé au coût estimé pour chaque modèle ($X = \text{Ag2}$ ou Desg2). $E(\text{coût}\%)$ est nommée la fonction de dépassement de coût et correspond à l'opposé de la fonction de robustesse. Finalement, la troisième mesure compare les coûts réalisés de projet par les deux modèles dans l'échéancier réalisé.

Le Tableau 4-9 rapporte les résultats moyens sur toutes les instances de projet. En analysant juste la colonne de la moyenne, nous relevons les constatations suivantes. Les coûts estimés initialement par le modèle agrégé sont plus optimistes que ceux estimés par le modèle désagrégé (mesure $E0(\text{coût}\%)$). Le modèle désagrégé est beaucoup plus robuste que le modèle agrégé (mesure $E(\text{coût}\%)$). Ceci montre l'effet considérable que joue l'incertitude liée à l'agrégation sur la robustesse de la qualité des échéanciers. Finalement, les écarts entre les deux modèles dans les coûts réalisés ($E1(\text{coût}\%)$) sont plus importants que ceux relevés dans les coûts estimés. La performance finale du modèle agrégé est considérablement moins bonne que celle du modèle désagrégé. Cependant, en analysant la colonne des écarts types, nous remarquons une dispersion importante dans les résultats, notamment pour le modèle agrégé. Nous allons donc nous intéresser aux résultats par classe d'instances afin de voir comment les résultats varient en fonction des paramètres N et K .

Tableau 4-9: Résultats moyens sur toutes les instances de projet

	Moyenne	Écart type
$E0(\text{coût}\%)$	-37.1%	26.27%
$E(\text{coût}\%)$ (Desg)	0.8%	10.4%
$E(\text{coût}\%)$ (Ag)	295%	2493%
$E1(\text{coût}\%)$	100.2%	1034.1%

4.5.1 Analyse par classe d'instances

Dans cette section, nous réalisons une analyse détaillée par classe d'instances afin de mesurer l'influence des paramètres N et K sur les trois mesures introduites dans la section précédente : $E0(\text{coût}\%)$, $E(\text{coût}\%)$ et $E1(\text{coût}\%)$.

Le Tableau 4-10 montre les écarts entre les coûts estimés par les modèles en fonction des paramètres N et K . Pour toutes les classes d'instances, les coûts estimés par le modèle agrégé sont plus optimistes que ceux du modèle désagrégé. Les deux paramètres influencent toutefois ces écarts. Plus K est grand et N est petit, moins les écarts sont importants et moins les résultats sont dispersés. On note que l'effet de N diminue quand K est grand ($K = 20$).

Tableau 4-10: Analyse de l'influence des paramètres de l'instance sur les écarts entre les coûts estimés par les deux modèles

	Moyenne de $E0(\text{coût}\%)$	Écart type de $E0(\text{coût}\%)$
$K = 3$	-56.9%	32.55%
$N = 10$	-43.7%	29.89%
$N = 20$	-53.7%	32.63%
$N = 50$	-73.3%	28.31%
$K = 10$	-33.8%	15.94%
$N = 10$	-21.7%	9.30%
$N = 20$	-30.5%	9.86%
$N = 50$	-49.3%	13.61%
$K = 20$	-20.7%	9.45%
$N = 10$	-12.3%	4.19%
$N = 20$	-18.3%	3.65%
$N = 50$	-31.4%	6.82%

L'agrégation conduit donc à une réduction des coûts estimés due à la plus grande flexibilité dans les contraintes de ressources sur les périodes agrégées en comparaison avec les périodes désagrégées. Cependant, cette plus grande flexibilité conduit à des sous-estimations des coûts comme illustré dans l'exemple suivant. Considérons un projet composé de deux lots utilisant une seule ressource r . Le premier lot requiert 14 unités de cette ressource tandis que le deuxième lot en requiert 24 unités. Supposons dans un premier temps que le projet est planifié sur une seule

période agrégée. La capacité disponible de la ressource r sur cette période est estimée à 40 unités. Le projet peut donc être planifié de façon optimale avec un coût nul comme le montre la Figure 4-11. Cependant, supposons qu'une fois plus d'informations deviennent disponibles, les capacités sur les périodes détaillées (obtenues en désagrégeant la période agrégée par un facteur de 4) s'avèrent être : 5, 15, 10 et 10 unités respectivement. En adoptant l'échéancier de la Figure 4-11, le coût du projet augmente de 6 unités comme le montre la Figure 4-12.

La Figure 4-13 montre un autre exemple basé cette fois sur une instance de projet test. On représente les échéanciers de référence générés par les modèles Ag2 et Desg2. L'instance de projet illustrée est caractérisée par 10 lots de travaux et 10 groupes de ressources. L'acronyme WP réfère à *Work Package* qui correspond à lot de travail. La figure montre également le profil d'utilisation d'un groupe de ressources parmi les 10 groupes de ressources utilisés. Nous constatons que dans l'échéancier généré par le modèle agrégé, on n'a pas eu besoin de recourir aux ressources non régulières contrairement à l'échéancier désagrégé. En effet, dans l'échéancier agrégé, grâce aux contraintes de ressources globales sur les périodes agrégées, le lot de travail 7 peut profiter de plus grandes capacités sur de courtes durées. Mais cette flexibilité diminue en passant au niveau désagrégé, ce qui conduit à des coûts plus élevés comme l'illustre l'échéancier désagrégé.

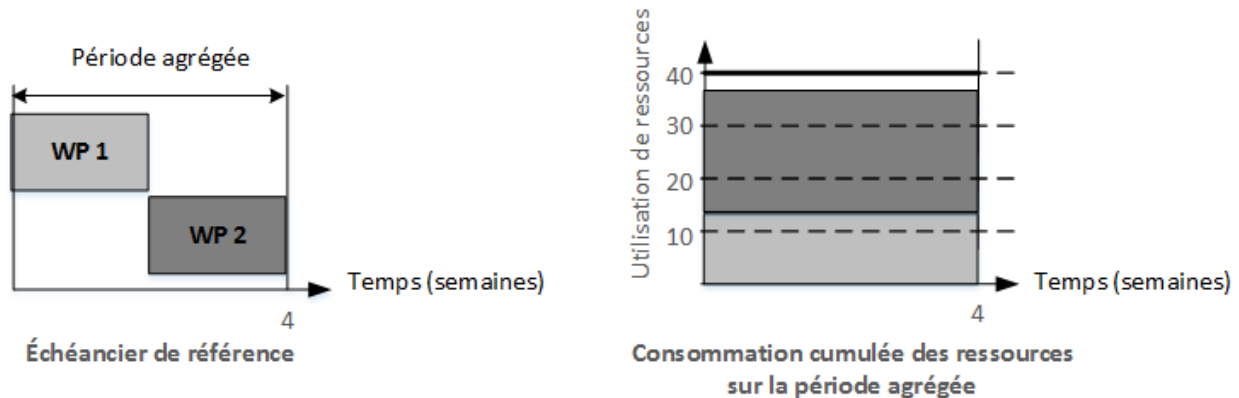


Figure 4-11: Planification agrégée avec un coût nul

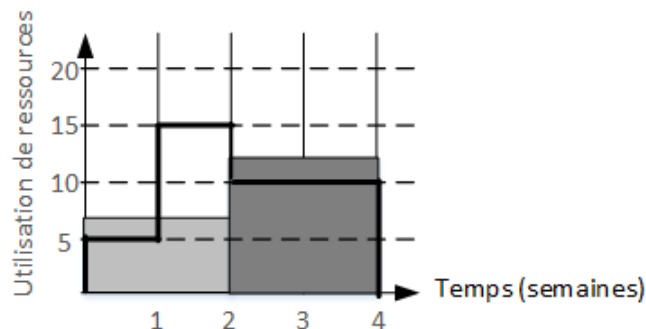


Figure 4-12: Augmentation de coût au niveau désagrégé

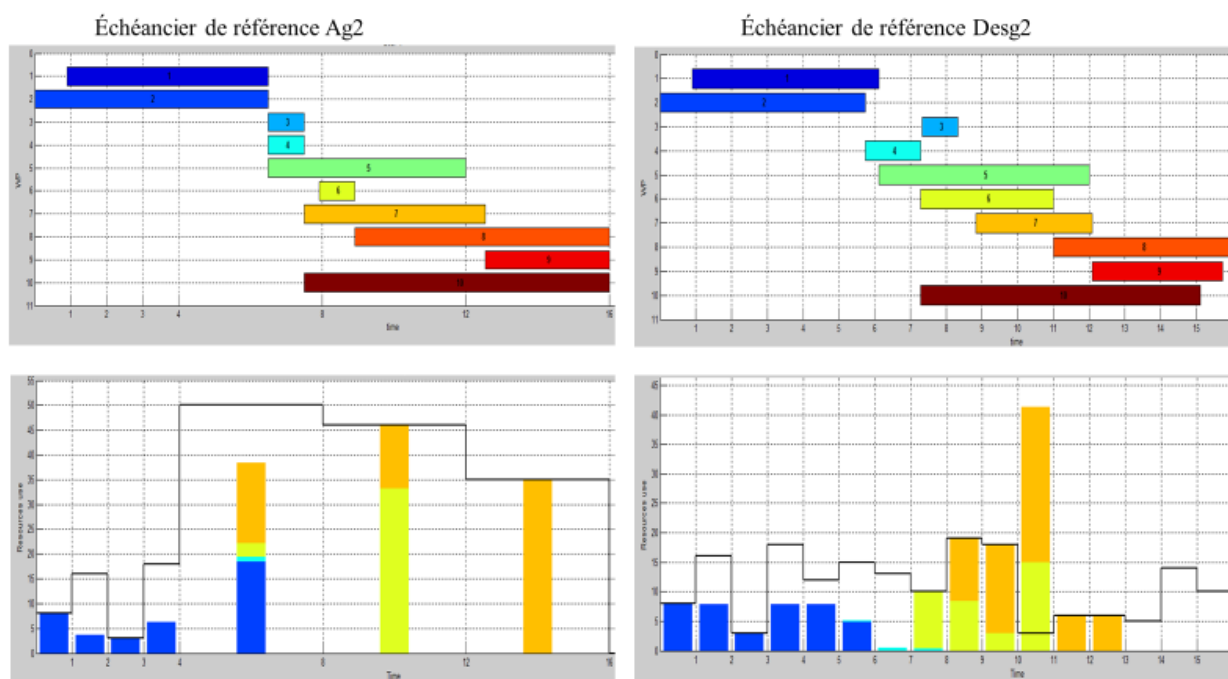


Figure 4-13: Exemple d'échéanciers de référence d'une instance de projet test

L'analyse de la fonction de dépassement de coût $E(\text{coût}\%)$ des modèles agrégés Ag2 et désagrégé Desg2 par classe d'instances va permettre d'étudier l'impact des incertitudes en fonction des paramètres K et N . À partir du Tableau 4-11, nous faisons les constatations suivantes :

- L'impact de l'incertitude liée à l'agrégation sur la robustesse est obtenu en comparant la robustesse (à travers la fonction de dépassement de coût) du modèle Ag2 au modèle

Desg2. Cet impact varie considérablement en fonction des paramètres K et N . Plus K est grand et N est petit, moins l'agrégation a de l'effet sur la robustesse.

- L'impact de l'incertitude liée aux charges de travail sur la robustesse est obtenu en analysant la robustesse du modèle désagrégé Desg2 où l'autre type d'incertitude (d'agrégation) est absent. L'incertitude dans les charges est beaucoup moins influente que l'incertitude liée à l'agrégation.
- Dans le modèle agrégé, quand le nombre de groupes de ressources est petit ($K = 3$), les variations de coûts sont très importantes ainsi que la dispersion des résultats. Quand K augmente, les variations de coût deviennent beaucoup plus raisonnables et homogènes.

Tableau 4-11: Analyse de l'impact des paramètres de l'instance sur la robustesse des deux modèles

	Ag2		Desg2	
	Moyenne de $E(\text{coût}\%)$	Écart type de $E(\text{coût}\%)$	Moyenne de $E(\text{coût}\%)$	Écart type de $E(\text{coût}\%)$
$K = 3$	781.1%	4284.7%	4.7%	15.5%
$N = 10$	151.2%	235.0%	3.7%	7.7%
$N = 20$	691.3%	3849.2%	6.4%	13.1%
$N = 50$	1500.8%	6325.5%	4.0%	22.3%
$K = 10$	74.2%	77.3%	-1.5%	7.3%
$N = 10$	35.0%	21.6%	0.3%	0.5%
$N = 20$	58.4%	37.8%	0.6%	1.0%
$N = 50$	129.1%	106.6%	-5.3%	11.8%
$K = 20$	31.1%	17.4%	-0.8%	3.1%
$N = 10$	16.7%	6.6%	0.2%	0.3%
$N = 20$	26.1%	5.5%	0.1%	0.5%
$N = 50$	50.4%	15.0%	-2.6%	4.8%

D'après le Tableau 4-12, l'effet de l'incertitude liée à l'agrégation sur le coût final du projet varie de la même façon en fonction des paramètres K et N . Ainsi, plus K est grand et N est petit, moins cette incertitude a de l'effet sur la performance finale du projet et plus les résultats sont homogènes.

Tableau 4-12: Analyse de l'influence des paramètres de l'instance sur les écarts entre les coûts réalisés par les deux modèles

	Moyenne de $E1(\text{coût}\%)$	Écart type de $E1(\text{coût}\%)$
$K = 3$	290.9%	1779.8%
$N = 10$	20.5%	33.8%
$N = 20$	555.2%	2783.9%
$N = 50$	296.9%	1317.1%
$K = 10$	6.8%	6.4%
$N = 10$	3.5%	3.2%
$N = 20$	6.0%	4.4%
$N = 50$	10.8%	8.1%
$K = 20$	3.1%	2.3%
$N = 10$	1.8%	1.5%
$N = 20$	2.7%	1.5%
$N = 50$	4.7%	2.5%

Afin de comprendre l'influence importante des paramètres K et N sur les résultats, en particulier le paramètre K , nous avons effectué une analyse plus détaillée et avons constaté que les variations des mesures $E0(\text{coût}\%)$, $E(\text{coût}\%)$ et $E1(\text{coût}\%)$ en fonction des paramètres K et N est corrélée avec la variation en fonction de ces paramètres des coûts relatifs aux exigences totales du projet en ressources (somme des charges de travail des lots). Nommons les exigences totales en ressources par tous les lots de travaux dans l'échéancier de référence par : $ExigT^{rf}$ et dans l'échéancier réalisé par : $ExigT^{rl}$. Nous introduisons ainsi les variables suivantes :

$$\text{coûtRel}_X^{rf} = \text{coût}_X^{rf} / \text{ExigT}^{rf}$$

$$\text{coûtRel}_X^{rl} = \text{coût}_X^{rl} / \text{ExigT}^{rl}$$

Ces variables représentant le coût relatif aux exigences totales en ressources selon le modèle $X = \text{Ag2}$ ou Desg2 dans l'échéancier de référence et l'échéancier réalisé respectivement. Le coût représente la portion de ces exigences réalisée par des ressources non régulières. Tableau 4-13 rapporte les coûts relatifs moyens par classe d'instances dans les échéanciers de référence ainsi que dans les échéanciers réalisés. À noter que pour les échéanciers réalisés, c'est la moyenne des

coûts relatifs sur tous les scénarios de projet simulés qui est considérée dans les calculs. Le tableau montre que plus K est grand et N est petit, plus les coûts relatifs sont grands, c'est-à-dire que les coûts se rapprochent des exigences totales en ressources, et ceci pour les deux modèles.

Tableau 4-13: Coûts relatifs moyens par classe d'instance

	Moy. $\text{coûtRel}_{Ag2}^{rf}$	Moy. $\text{coûtRel}_{Desg2}^{rf}$	Moy. $\text{coûtRel}_{Ag2}^{rl}$	Moy. $\text{coûtRel}_{Desg2}^{rl}$
$K = 3$	5.9%	10.8%	13.1%	11.1%
$N = 10$	9.0%	14.7%	16.6%	14.9%
$N = 20$	6.2%	11.1%	13.4%	11.3%
$N = 50$	2.6%	6.7%	9.4%	7.0%
$K = 10$	19.3%	27.3%	28.9%	27.5%
$N = 10$	29.1%	36.9%	38.3%	37.0%
$N = 20$	19.4%	28.1%	29.8%	28.2%
$N = 50$	9.3%	16.8%	18.8%	17.2%
$K = 20$	37.0%	45.1%	46.5%	45.3%
$N = 10$	50.8%	57.8%	58.9%	57.9%
$N = 20$	38.8%	47.5%	48.8%	47.5%
$N = 50$	21.3%	30.0%	31.7%	30.3%

Les variations des mesures $E0(\text{coût}\%)$, $E(\text{coût}\%)$ et $E1(\text{coût}\%)$ en fonction des paramètres K et N peuvent donc être causées par les variations dans les valeurs des coûts relatifs. Afin de confirmer cette constatation, nous avons étudié les coûts relatifs en fonction des trois mesures $E0(\text{coût}\%)$, $E(\text{coût}\%)$ et $E1(\text{coût}\%)$. Figure 4-14 et Figure 4-15 illustrent la variation respective de $\text{coûtRel}_{Ag2}^{rf}$ et $\text{coûtRel}_{Desg2}^{rf}$ en fonction de $E0(\text{coût}\%)$. Nous constatons que plus le coût relatif aux exigences totales estimé par les deux modèles est élevé, moins la différence entre les coûts estimés par les deux modèles est importante et moins la courbe est dispersée. Le même constat est relevé dans la Figure 4-16 et Figure 4-17. Pour chacun des deux modèles, plus le coût relatif aux exigences de l'échéancier de référence est élevé, plus les modèles sont robustes selon la mesure $E(\text{coût}\%)$.

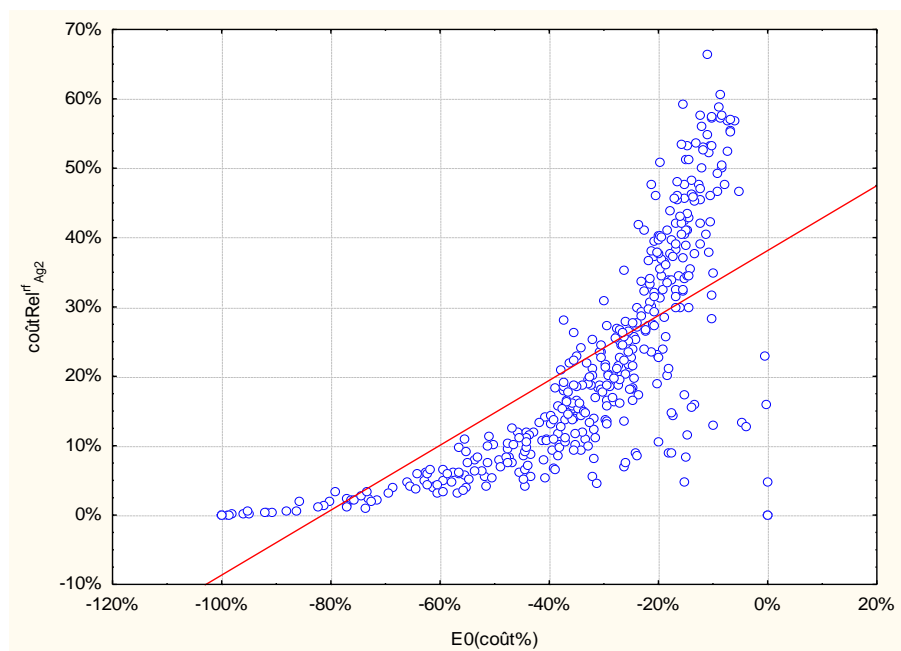


Figure 4-14: Coûts relatifs estimés par le modèle agrégé en fonction de la mesure $E0(\text{coût}\%)$

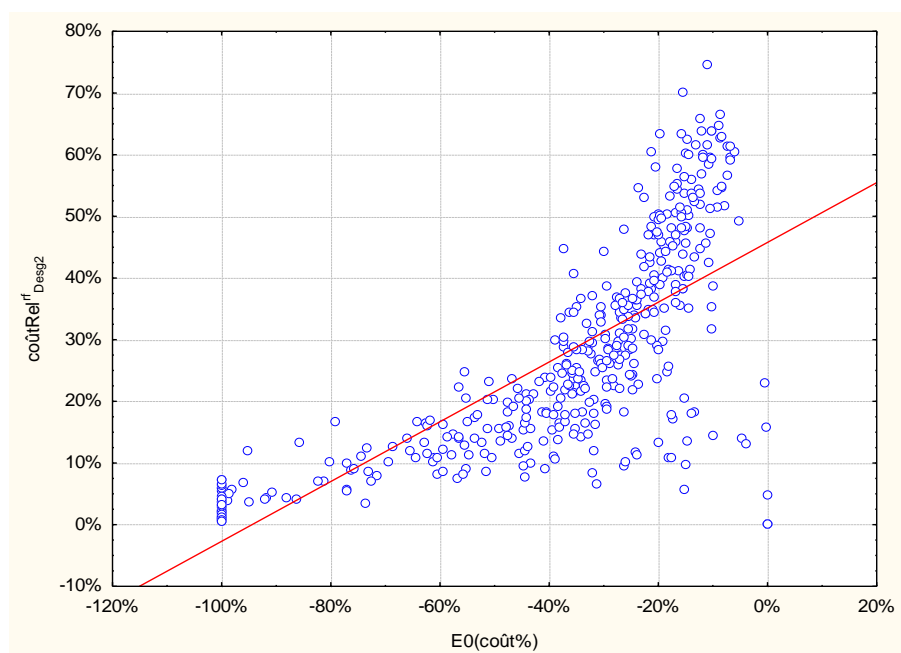


Figure 4-15: Coûts relatifs estimés par le modèle désagrégé en fonction de la mesure $E0(\text{coût}\%)$

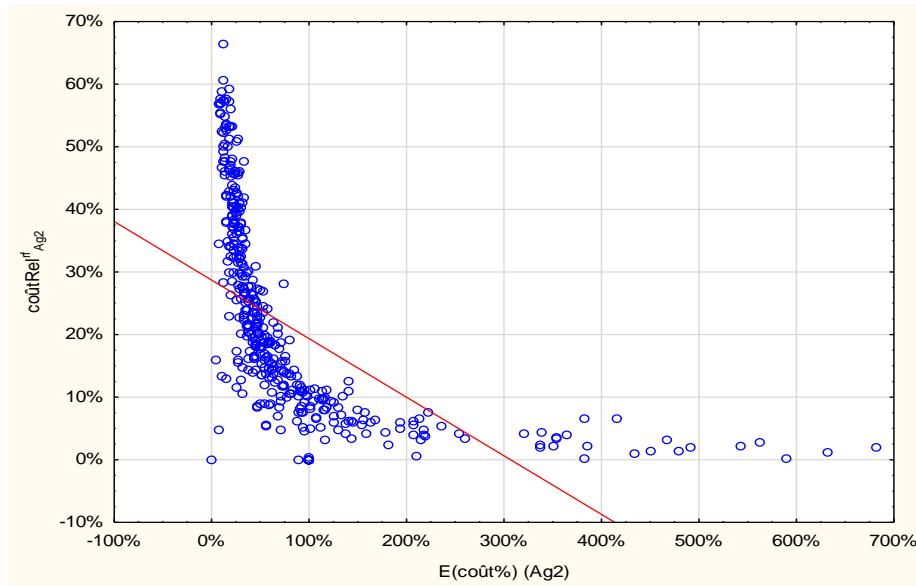


Figure 4-16: Coûts relatifs estimés par le modèle agrégé selon la fonction de dépassement de coût $E(\text{coût}\%)$

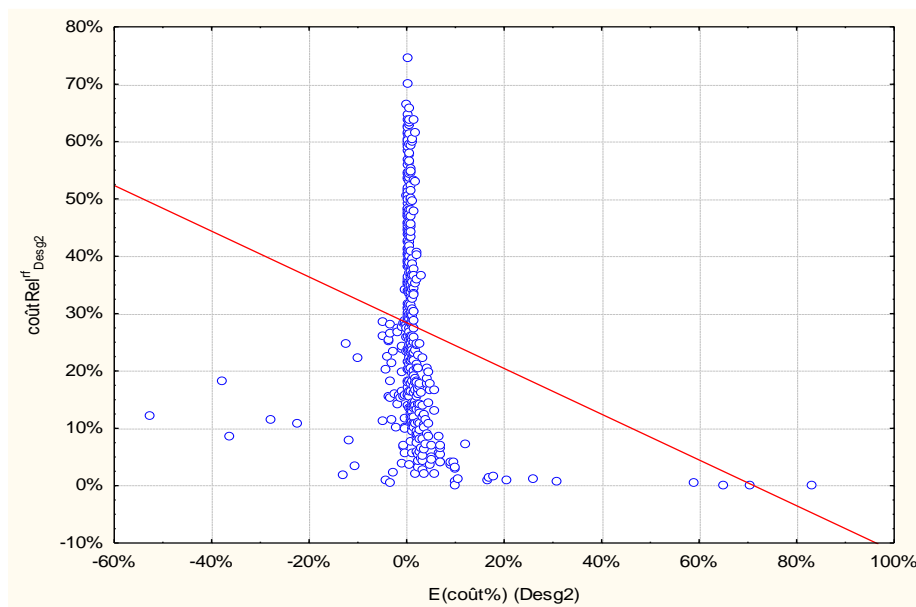


Figure 4-17: Coûts relatifs estimés par le modèle désagrégé selon la fonction de dépassement de coût $E(\text{coût}\%)$

Ces observations peuvent être illustrées par un exemple simple. Nous allons nous intéresser à la fonction de dépassement de coût $E(\text{coût}\%)$. Supposons que l'exigence totale d'un projet en ressources est de 1000 unités. Dans le cas où le coût estimé est de 1\$ par exemple, le coût peut

facilement passer à 10\$ dans l'échéancier réalisé, en particulier pour le modèle agrégé. En se basant sur la fonction $E(\text{coût}\%)$, ceci entraînera une augmentation de coût de 900%, alors que l'augmentation est de seulement 0.9% par rapport aux exigences totales en ressources. D'un autre côté, si on suppose que le coût estimé est de 500\$, et que l'on a une augmentation de coût de 200\$ dans l'échéancier réalisé, ceci donnera une variation de coût de 40%, mais le coût a augmenté de 20% par rapport aux exigences totales en ressources. Les mesures $E0$, $E1$ et E utilisées peuvent donc donner une fausse impression des variations des coûts si l'on n'inclut pas le rapport aux exigences totales, en particulier pour les instances où $K = 3$ puisque les coûts y sont les plus réduits par rapport aux exigences totales.

Nous proposons alors d'introduire de nouvelles mesures qui vont tenir compte des exigences globales en ressources. L'acronyme *moy* désigne la moyenne sur tous les scénarios de projet simulés. Ces mesures sont les suivantes :

$$E'0(\text{coût}\%) = (\text{coûtRel}_{Ag2}^{rf} - \text{coûtRel}_{Desg2}^{rf})$$

$$E'(\text{coût}\%) = \text{moy}[(\text{coût}_X^{rl} - \text{coût}_X^{rf})/ExigT^{rf}]$$

$$E'1(\text{coût}\%) = \text{moy}(\text{coûtRel}_{Ag2}^{rl} - \text{coûtRel}_{Desg2}^{rl})$$

La première mesure compare les coûts relatifs estimés dans les échéanciers de référence, la deuxième mesure correspond à la fonction de dépassement de coût relatif pour le modèle $X = Ag2$ ou $Desg2$. Elle est calculée pour chaque modèle et permet de mesurer la robustesse des coûts. Finalement, la troisième mesure compare les coûts relatifs dans les échéanciers réalisés. Le Tableau 4-14 et Tableau 4-15 rapportent les résultats. Avec ces nouvelles mesures, nous faisons les constatations suivantes :

- Les résultats sont beaucoup plus homogènes et les variations raisonnables ;
- Les paramètres K et N n'ont pas d'effet significatif sur les résultats ;
- L'agrégation tend à sous-estimer les coûts dans les échéanciers de référence ;
- L'incertitude liée à l'agrégation a un effet négatif sur la robustesse ;
- L'incertitude liée à l'agrégation a un impact plus important sur la robustesse comparée à l'incertitude reliée aux charges de travail ; et

- La performance finale du modèle agrégé est comparable à celle du modèle désagrégé.

Tableau 4-14: Robustesse des deux modèles selon la mesure $E'(\text{coût}\%)$ par classe d'instance

	Ag2		Desg2	
	Moy. $E'(\text{coût}\%)$	ET. $E'(\text{coût}\%)$	Moy. $E'(\text{coût}\%)$	ET. $E'(\text{coût}\%)$
$K = 3$	7.3%	3.2%	0.2%	0.3%
$N = 10$	7.7%	4.0%	0.3%	0.2%
$N = 20$	7.2%	2.9%	0.2%	0.2%
$N = 50$	6.9%	2.4%	0.0%	0.4%
$K = 10$	9.4%	2.2%	-0.3%	1.9%
$N = 10$	8.9%	2.8%	0.1%	0.2%
$N = 20$	10.0%	2.1%	0.1%	0.4%
$N = 50$	9.2%	1.5%	-1.2%	3.1%
$K = 20$	9.4%	2.1%	-0.2%	1.0%
$N = 10$	8.2%	2.6%	0.1%	0.2%
$N = 20$	10.0%	1.6%	0.1%	0.2%
$N = 50$	10.2%	1.3%	-0.8%	1.6%

Tableau 4-15: Comparaison des coûts relatifs par classe d'instance dans les échéanciers de référence et réalisés

	Moy. $E'0(\text{coût}\%)$	ET. $E'0(\text{coût}\%)$	Moy. $E'1(\text{coût}\%)$	ET. $E'1(\text{coût}\%)$
$K = 3$	-5.1%	3.1%	2.1%	1.4%
$N = 10$	-5.7%	3.7%	1.7%	1.6%
$N = 20$	-4.9%	2.8%	2.0%	1.3%
$N = 50$	-4.6%	2.7%	2.4%	1.0%
$K = 10$	-8.2%	2.6%	1.5%	0.9%
$N = 10$	-7.6%	2.4%	1.2%	1.0%
$N = 20$	-8.3%	2.1%	1.6%	1.0%
$N = 50$	-8.8%	3.2%	1.6%	0.8%
$K = 20$	-8.4%	2.1%	1.2%	0.8%
$N = 10$	-7.1%	2.4%	1.0%	0.9%
$N = 20$	-8.6%	1.7%	1.3%	0.7%
$N = 50$	-9.5%	1.5%	1.4%	0.6%

4.5.2 Impact du niveau de variabilité des charges de travail sur les résultats

Dans cette sous-section, nous faisons varier le niveau de variabilité des charges de travail dans les expérimentations afin d'en analyser l'impact sur la robustesse et la performance des modèles Ag2 et Desg2. Quatre niveaux de variabilité sont définis comme l'illustre le Tableau 4-16. Le paramètre α représente la proportion d'écart des valeurs minimales et maximales par rapport à la valeur la plus probable de la distribution. Rappelons que les détails sur la loi de distribution utilisée sont fournis au chapitre précédent à la section 3.3.2. Les tests sont effectués sur les 50 plus larges instances de projet ($K = 20$ et $N = 50$) puisque nous nous intéressons aux grands projets. Le même cadre expérimental est appliqué pour tous les niveaux de variabilité avec 100 scénarios de projet simulés pour chaque instance à chaque niveau et pour chacun des deux modèles Ag2 et Desg2.

Tableau 4-16: Paramétrage des niveaux de variabilité des charges de travail

Niveau d'incertitude dans les charges de travail	Nul	Bas	Moyen	Élevé
Valeur du paramètre α	0	0.1	0.25	0.5

Les Tableau 4-17 et Tableau 4-18 rapportent les résultats moyens du calcul de la robustesse des modèles pour les différents niveaux de variabilité en se basant sur la mesure $E(\text{coût}\%)$ et $E'(\text{coût}\%)$ respectivement. Nous constatons que le niveau d'incertitude dans les charges de travail n'a pas d'effet significatif sur la robustesse des deux modèles. Par exemple, pour tous les niveaux de variabilité (y compris le niveau $\pm 0\%$), nous avons des variations de l'ordre de 50% pour le modèle agrégé. Ce résultat consolide nos observations précédentes que l'incertitude liée à l'agrégation est la principale source de variations des coûts. À noter que la variation de coût moyenne non nulle observée pour le niveau $\pm 0\%$ du modèle désagrégé est due à des instances qui n'atteignent pas l'optimalité dans les résolutions CPLEX.

Tableau 4-17: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur la robustesse des modèles selon la mesure $E(\text{coût}\%)$

Incertitude dans les charges de travail	Ag2		Desg2	
	Moy. $E(\text{coût}\%)$	ET. $E(\text{coût}\%)$	Moy. $E(\text{coût}\%)$	ET. $E(\text{coût}\%)$
$\pm 0\%$	51.3%	15.8%	-2.6%	5.8%
$\pm 10\%$	50.4%	15.0%	-2.6%	4.8%
$\pm 25\%$	50.9%	15.5%	-1.8%	5.4%
$\pm 50\%$	53.6%	16.9%	0.8%	4.0%

Tableau 4-18: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur la robustesse des modèles selon la mesure $E'(\text{coût}\%)$

Incertitude dans les charges de travail	Ag2		Desg2	
	Moy. $E'(\text{coût}\%)$	ET. $E'(\text{coût}\%)$	Moy. $E'(\text{coût}\%)$	ET. $E'(\text{coût}\%)$
$\pm 0\%$	10.3%	1.5%	-0.8%	2.0%
$\pm 10\%$	10.2%	1.3%	-0.8%	1.6%
$\pm 25\%$	10.3%	1.3%	-0.6%	1.9%
$\pm 50\%$	10.8%	1.4%	0.2%	1.3%

Nous analysons dans le Tableau 4-19 l'impact du niveau de variabilité des charges sur les écarts entre les coûts réalisés par les deux modèles selon les deux mesures $E1(\text{coût}\%)$ et $E'1(\text{coût}\%)$. De même, nous observons que ce paramètre n'a pas d'impact significatif sur les résultats, quoiqu'une légère diminution des écarts soit constatée pour les niveaux d'incertitude élevés. Pour tous les niveaux de variabilité, la performance finale du modèle agrégé reste toutefois comparable à celle du modèle désagrégé.

Tableau 4-19: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur les écarts entre les coûts réalisés par les deux modèles

Incertitude dans les charges de travail	<i>E1(coût%)</i>		<i>E'1(coût%)</i>	
	Moy.	ET.	Moy.	ET.
± 0%	5.5%	3.0%	1.6%	0.7%
± 10%	4.7%	2.5%	1.4%	0.6%
± 25%	4.2%	2.4%	1.2%	0.6%
± 50%	3.6%	2.2%	1.0%	0.5%

4.6 Conclusion

Nous résumons dans les points suivants les principales observations relevées suite aux expérimentations concernant la performance et robustesse de la qualité du modèle agrégé à durées variables des périodes comparativement au modèle désagrégé :

- L'agrégation (des périodes de planification) permet de réduire considérablement l'effort de planification en réduisant les temps de calcul et l'effort de collecte et d'estimation des données ;
- L'impact de l'incertitude liée à l'agrégation sur la robustesse de la qualité de l'échéancier tactique est plus important dans la variante *time-driven* du problème RCCP comparativement à la variante *resource-driven*. En d'autres termes, ce type d'incertitude a plus d'influence sur les variations de coût que sur les variations de délais ;
- L'agrégation tend à sous-estimer les durées et coûts du projet. Cependant, pour les projets caractérisés par un grand nombre de lots de travaux et un nombre réduit de groupes de ressources, l'agrégation n'impacte pas l'estimation des délais ;
- L'incertitude liée à l'agrégation a un impact négatif sur la robustesse de la qualité de l'échéancier tactique, que la qualité soit reliée au coût ou à la durée du projet. Cependant, pour les projets caractérisés par un grand nombre de lots de travaux et un nombre réduit

de groupes de ressources, cette incertitude a peu ou pas d'impact sur la robustesse des délais (variante *resource-driven* du RCCP) ;

- L'incertitude liée à l'agrégation a peu d'impact sur la performance finale du projet, c'est-à-dire sa durée et son coût dans les échéanciers réalisés ;
- L'incertitude liée aux charges de travail a globalement moins d'impact sur la robustesse de la qualité de l'échéancier comparativement à l'incertitude liée à l'agrégation, en particulier pour la variante *time-driven* du problème RCCP, où son effet est négligeable quel que soit le niveau d'incertitude des charges de travail. Quant à la variante *resource-driven*, l'incertitude liée aux charges de travail est plus influente sur la robustesse pour les grandes instances et les niveaux élevés d'incertitude ;
- Les mesures de robustesse/dépassement de coût et de performance qui ne rapportent pas les variations de coût aux exigences globales en ressources peuvent donner de fausses indications sur les variations de coût, en particulier pour les instances caractérisées par un petit nombre de groupes de ressources, où le rapport des coûts d'utilisation des ressources non régulières aux exigences globales est plus réduit. Ces indications biaisées de variations de coût sont particulièrement exacerbées pour le modèle agrégé en raison de la sous-estimation des coûts dans l'échéancier de référence et la performance finale légèrement moins bonne dans l'échéancier réalisé. En utilisant des mesures qui rapportent aux exigences globales en ressources, les variations de coûts du modèle agrégé sont beaucoup plus raisonnables quoique plus importantes que celles rapportées dans le modèle désagrégé en raison de l'effet de l'incertitude liée à l'agrégation ; et
- En adoptant les mesures de robustesse/dépassement de coût et de performance rapportant aux exigences globales en ressources pour la variante *time-driven* du problème RCCP, les paramètres N et K n'ont pas d'impact considérable sur les résultats.

Suite à ces observations, nous pouvons conclure que l'utilisation de méthodes d'agrégation au niveau tactique permet certes de réduire l'effort de planification, mais tend à sous-estimer la durée et les coûts du projet dans les échéanciers de référence. Négliger les incertitudes en particulier celle reliée à l'agrégation diminue la robustesse des échéanciers tactiques. D'où la nécessité d'introduire des approches proactives qui permettront d'anticiper les perturbations

tout en profitant des avantages de l'agrégation des données au niveau de planification tactique.

CHAPITRE 5 APPROCHE DE PLANIFICATION PROACTIVE POUR LE PROBLÈME *TIME-DRIVEN* RCCP SOUS INCERTITUDE

Dans ce chapitre, nous proposons une approche de planification proactive pour la variante *time-driven* du problème RCCP sous incertitude, ayant pour but de maximiser la robustesse de la qualité de l'échéancier tactique. La qualité de l'échéancier réfère dans ce chapitre au coût du projet. L'approche proactive s'appuie sur le modèle RCCP de base à durées variables des périodes développé au chapitre précédent. L'approche proposée est basée sur une technique d'introduction de réserves/marges de capacités de ressources sur les périodes agrégées afin de réduire l'effet de l'incertitude liée à l'agrégation, principale source de dépassements de coûts comme observé au chapitre précédent. Le chapitre est organisé comme suit. Nous décrivons d'abord le problème dans la section 5.1. Ensuite, nous décrivons dans la section 5.2 l'approche proactive proposée. Dans la section 5.3, nous présentons les tests effectués pour définir les tailles des marges. Dans la section 5.4, nous présentons les résultats des tests expérimentaux qui évaluent la performance et robustesse de l'approche proposée dans un environnement incertain. Finalement, nous concluons sur la pertinence de l'approche proactive dans la section 5.5.

5.1 Description du problème

Le problème étudié dans ce chapitre est le *time-driven* RCCP sous incertitude destiné au niveau de planification tactique des grands projets d'ingénierie et de construction. Les incertitudes considérées sont l'incertitude dans les charges de travail des lots ainsi que l'incertitude dans les capacités de ressources sur les périodes agrégées. L'incertitude sur les capacités estimées de ressources peut résulter de deux sources possibles : l'incertitude dans la magnitude (ou quantité) et l'incertitude dans la distribution en fonction du temps de cette capacité tout au long de la période de planification. Dans cette thèse, nous considérons uniquement la deuxième source d'incertitude, à savoir la distribution en fonction du temps, c'est-à-dire l'incertitude liée à l'agrégation des capacités.

La modélisation du problème s'appuie sur le modèle RCCP de base présenté dans le chapitre précédent qui intègre plusieurs niveaux de planification à travers les durées variables des périodes. Les mêmes contraintes du modèle sont partagées, mais la fonction-objectif diffère. Le modèle déterministe de base a pour but de minimiser le coût de projet, tandis que le modèle

proactif proposé dans ce chapitre a pour but de maximiser la fonction de robustesse de coût en considérant les données incertaines. Les changements par rapport au modèle de base sont explicités dans ce qui suit.

Les charges de travail des lots sont considérées stochastiques au lieu d'être déterministes. La distribution en fonction du temps des capacités sur les périodes agrégées est également considérée incertaine. Cette distribution est modélisée à travers la désagrégation des capacités sur les périodes agrégées en capacités sur des sous-périodes. Le nombre de sous-périodes doit refléter le niveau de détail requis pour le niveau suivant dans la hiérarchie, à savoir le niveau tactique/opérationnel, où les capacités de ressources sont considérées certaines. Sans perte de généralités, nous supposons que les sous-périodes ont une durée égale à une semaine. La somme des capacités des sous-périodes doit correspondre à la capacité cumulée estimée sur la période agrégée dans le modèle tactique. Ainsi, en divisant la période p en n sous-périodes, la capacité régulière K_{rp} du groupe de ressources r est désagrégée comme suit :

$$K_{rp} = \sum_{j=1}^n k_{rpj} \quad p \in P, r \in R$$

Où k_{rpj} est la capacité désagrégée de la $j^{\text{ème}}$ sous-période de la période p (Figure 5-1). Nous regroupons toutes les sous-périodes générées dans un ensemble global $L = \{l = 1, \dots, H\}$ de périodes détaillées.

L'objectif est de construire un échéancier réalisable en respectant toutes les contraintes (relations de précedence, charges maximales admissibles, respect des dates de lancement et les contraintes de ressources globales sur les périodes) et robuste à travers la maximisation de la fonction de robustesse de coût. Maximiser la fonction de robustesse de coût revient à minimiser la fonction de dépassement de coût.

Comme expliqué au chapitre précédent, la fonction de dépassement de coût peut être formulée sous deux formes :

$$E(\text{coût}\%) = E((\text{coût}^{rl} - \text{coût}^{rf})/\text{coût}^{rf})$$

$$E'(\text{coût}\%) = E((\text{coût}^{rl} - \text{coût}^{rf})/\text{Exig}T^{rf})$$

La première formulation mesure l'espérance mathématique du dépassement de coût en pourcentage de l'échéancier réalisé par rapport à l'échéancier de référence. Quant à la deuxième

formulation, elle mesure l'espérance mathématique du dépassement de coût de l'échéancier réalisé par rapport à l'échéancier de référence en se rapportant aux exigences globales en ressources du projet dans l'échéancier de référence.

Le coût de l'échéancier de référence est exprimé en fonction des charges non régulières effectuées sur les périodes à durées variables $p \in P$: $\text{coût}^{rf} = \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} \text{yext}_{rp}$, tandis que le coût de l'échéancier réalisé est exprimé en fonction des charges non régulières actuellement réalisées sur les périodes détaillées $l \in L$: $\text{coût}^{rl} = \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \text{yext}_{rl}$. En effet, l'échéancier réalisé est obtenu une fois tous les aléas déployés et les lots exécutés.

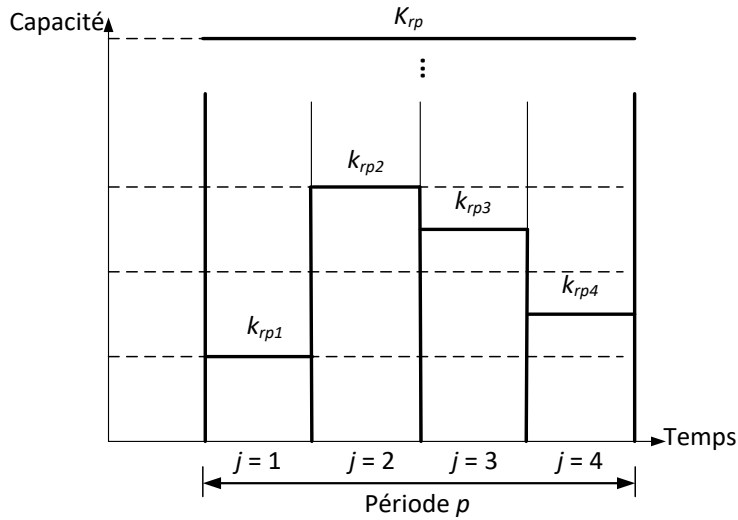


Figure 5-1: Illustration de la désagrégation des capacités de ressources

Malheureusement, les fonctions de robustesse sont très difficiles à évaluer et maximiser, même pour des problèmes sans contrainte de ressources, à cause de la nature stochastique des paramètres incertains [Hagstrom, 1988]. Par conséquent, afin de produire un échéancier robuste qui maximise la fonction de robustesse, la majorité des approches proactives d'ordonnancement de la littérature sont des heuristiques et des métaheuristiques qui visent la production d'un plan solide en y ajoutant de la sécurité et utilisent par la suite la simulation pour évaluer la fonction-objectif de robustesse.

Dans ce sens, nous proposons dans la prochaine section une approche proactive pour résoudre le problème RCCP sous incertitude en se basant sur une stratégie d'introduction de réserves de

capacités et en évaluant par la suite la fonction de robustesse à l'issue de l'application de l'approche réactive à horizon roulant basée sur la simulation (voir la description à la section 3.3.2).

5.2 Description de l'approche proactive

Au chapitre précédent, un modèle RCCP déterministe a été proposé pour le niveau de planification tactique. Ce modèle a été cependant évalué dans un contexte incertain afin de mesurer l'impact des incertitudes sur la performance et la robustesse liée à la qualité de l'échéancier lorsqu'elles ne sont pas anticipées. Dans cette section, nous proposons une approche de planification tactique proactive qui va justement permettre d'anticiper les perturbations causées par les incertitudes influentes.

Au chapitre précédent, nous avons constaté que l'incertitude liée à l'agrégation des capacités est la principale cause des variations de coûts pour la variante *time-driven* du RCCP, alors que l'incertitude liée aux charges de travail a un effet négligeable. Notre approche proactive sera donc principalement axée sur la protection de l'échéancier tactique de référence contre l'incertitude liée à l'agrégation des capacités. La Figure 5-2 présente un diagramme des principales étapes de l'approche proactive proposée. L'incertitude dans les charges de travail est prise en compte en considérant les valeurs les plus probables des charges à partir de leurs distributions stochastiques (étape 1). L'incertitude liée à l'agrégation des capacités est considérée à travers la réduction des capacités sur les périodes agrégées d'un certain pourcentage $\alpha\%$, ou en d'autres termes en introduisant des réserves de capacités (étape 2). L'introduction des réserves de capacités permet de réduire la plus grande flexibilité dans les contraintes de ressources sur les périodes agrégées par rapport aux périodes détaillées. Si nous reprenons l'exemple du chapitre précédent (Figure 4-11, Figure 4-12), la capacité sur la période agrégée est de 40 unités. Si nous introduisons une réserve de 10% de la capacité, le coût estimé du projet va passer de 0 à 2. Si nous introduisons une réserve de 20% de la capacité, le coût estimé passera à 6 comme l'illustre la Figure 5-3. Comme le rappelle la figure, le coût réel est de 6. L'introduction d'une réserve de capacité permet donc d'avoir des estimations de coût plus réalistes et de réduire ainsi les écarts de coût avec le modèle désagrégé. Trouver cependant la bonne taille de la réserve de capacité est important afin de se rapprocher le plus possible du coût réel.

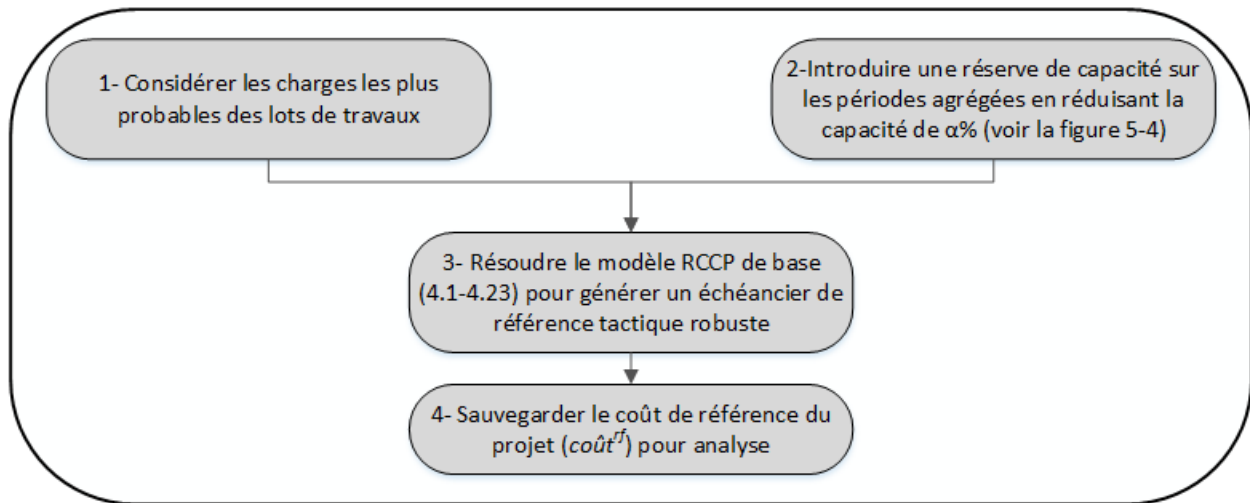


Figure 5-2: Diagramme de l'approche proactive proposée pour le *time-driven* RCCP sous incertitude

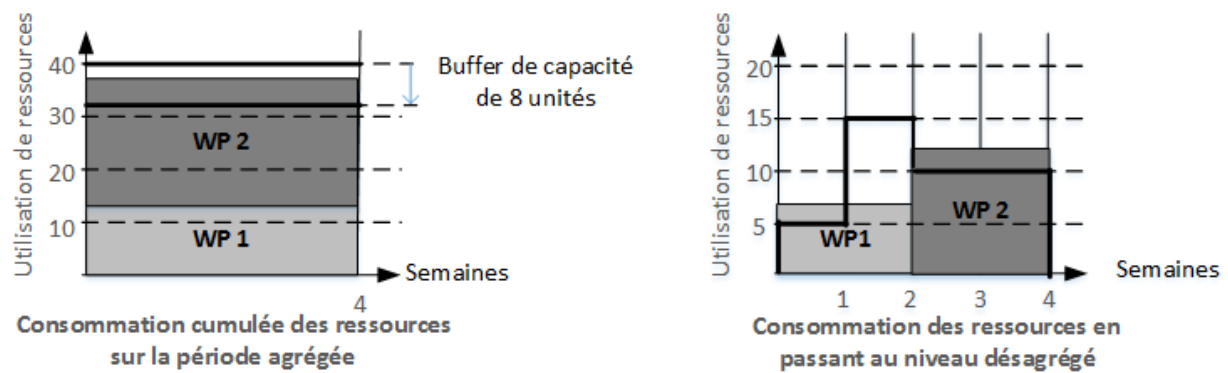


Figure 5-3: Exemple de l'impact de l'introduction d'une réserve de capacité sur le coût

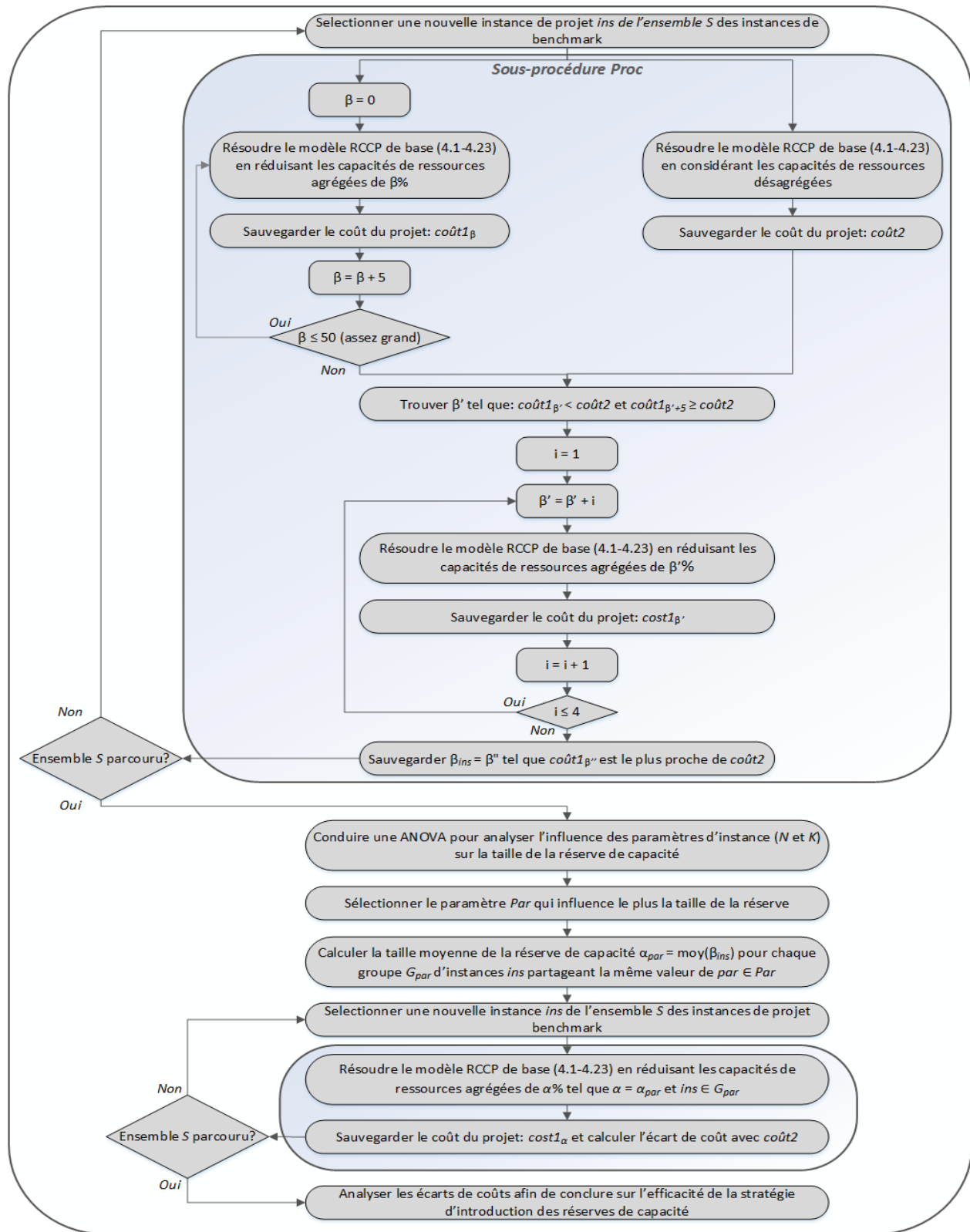


Figure 5-4: Diagramme définissant les tailles des réserves de capacité

La Figure 5-4 présente le diagramme de la stratégie suivie pour définir la taille adéquate des réserves de capacités sur les instances de projet test. Les mêmes instances de projet présentées au chapitre précédent (section 4.3.1) pour résoudre le modèle RCCP de base sont utilisées. Le principe de la stratégie est de prédire la taille de la réserve de capacité en se basant uniquement sur les paramètres de projet pertinents. Afin d'atteindre cet objectif, nous appliquons d'abord la sous-procédure Proc (voir Figure 5-4) à chaque instance de projet. Le but de cette sous-procédure est de trouver pour chaque instance la taille optimale de la réserve de capacité $\beta_{ins}\%$ (β_{ins} étant un nombre entier) qui permet, une fois appliqué, de se rapprocher le plus possible du coût de projet qui aurait été obtenu si toutes les périodes étaient détaillées et les capacités désagrégées connues avec certitude. Les instances de De Boer [1998] sont utilisées pour représenter ces données désagrégées comme au chapitre précédent. Une fois cette procédure appliquée à toutes les instances, nous effectuons une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs afin d'analyser l'impact des paramètres K et N sur les tailles des réserves de capacité. Nous sélectionnons le paramètre Par le plus influant et groupons les instances selon les niveaux de valeur de ce paramètre. Pour chacun de ces groupes, nous calculons la moyenne des tailles optimales des réserves de capacité trouvées à l'aide de la procédure Proc. Nous résolvons ensuite le modèle RCCP de base (4.1-4.23) pour toutes les instances de projet en appliquant ces tailles moyennes de réserves : $\alpha\%$ (voir Figure 5-4). Pour chaque instance, le coût de projet obtenu est comparé au coût de l'instance désagrégée correspondante. Si les écarts de coût obtenus sont petits, nous pouvons conclure sur l'efficacité de la stratégie d'introduction des réserves de capacité dans la réduction de l'effet de l'agrégation sur l'estimation des coûts.

5.3 Définition des tailles des réserves de capacité

En testant la stratégie de définition des réserves de capacité illustrée dans la Figure 5-4, à chaque fois que nous avons eu besoin de résoudre le modèle RCCP de base, nous avons utilisé la même grille de calcul présentée dans le chapitre précédent, exécuté le modèle avec le solveur IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.1.0 et terminé la recherche après 50000 secondes. Les résultats de la stratégie sont présentés dans ce qui suit.

Le Tableau 5-1 rappelle les différences de coût entre le modèle agrégé de base Ag2 et le modèle désagrégé Desg2 selon les deux mesures $E0(\text{coût}\%)$ et $E'0(\text{coût}\%)$. Le Tableau 5-2 présente

les tailles des réserves de capacité optimales trouvées à l'issue de l'application de la procédure Proc et le Tableau 5-3 présente les écarts de coûts entre les échéanciers de référence agrégés protégés avec les réserves de capacité optimales et les échéanciers désagrégés. Nous observons, à partir du Tableau 5-2, que le paramètre K a une influence apparente sur les tailles des réserves. Afin de confirmer cette observation, nous avons conduit une analyse ANOVA sur le logiciel *Statistica* afin d'analyser les impacts des deux paramètres N et K sur les tailles des réserves. L'analyse montre que les deux paramètres ont un effet significatif sur les tailles des réserves de capacité avec un effet plus important du paramètre K (valeur-p du paramètre $K = 3.54\text{E-}14$ et valeur-p du paramètre $N = 1.58\text{E-}03$). Les Figure 5-5 et Figure 5-6 montrent les valeurs moyennes ainsi que l'intervalle de confiance à 95% des tailles des réserves de capacité selon les valeurs des paramètres N et K respectivement. Nous pouvons en déduire l'effet plus significatif et plus facilement interprétable du paramètre K comparativement au paramètre N . En effet, les tailles des réserves de capacité augmentent quand le nombre de groupes de ressources augmente. K est ainsi le paramètre sélectionné : $Par = K$ (voir Figure 5-4). Nous observons aussi une décroissance dans la pente de la courbe quand le paramètre K augmente, ce qui suggère que la courbe va tendre à s'aplatir pour des valeurs plus grandes du paramètre K .

Tableau 5-1: Écarts de coûts entre les échéanciers de référence agrégés non protégés et les échéanciers de référence désagrégés

	Moyenne de $E0(\text{coût}\%)$	Écart type de $E0(\text{coût}\%)$	Moyenne de $E'0(\text{coût}\%)$	Écart type de $E'0(\text{coût}\%)$
$K = 3$	-56.6%	32.6%	-4.9%	3.1%
$N = 10$	-43.7%	30.2%	-5.7%	3.7%
$N = 20$	-53.1%	32.1%	-4.8%	2.7%
$N = 50$	-73.0%	28.6%	-4.2%	2.5%
$K = 10$	-33.8%	15.2%	-8.0%	2.1%
$N = 10$	-22.5%	9.5%	-7.8%	2.3%
$N = 20$	-31.7%	9.3%	-8.6%	2.1%
$N = 50$	-47.2%	14.5%	-7.4%	1.5%
$K = 20$	-20.1%	8.7%	-8.1%	2.0%
$N = 10$	-12.1%	4.2%	-6.9%	2.4%
$N = 20$	-18.5%	3.6%	-8.7%	1.6%
$N = 50$	-29.7%	6.2%	-8.7%	1.4%

Tableau 5-2: Tailles optimales des réserves de capacité selon la procédure Proc

	Moyenne des réserves des capacités	Écart type des réserves des capacités
$K = 3$	14.9%	7.4%
$N = 10$	15.3%	9.0%
$N = 20$	15.9%	8.1%
$N = 50$	13.5%	4.4%
$K = 10$	18.9%	4.7%
$N = 10$	19.4%	5.2%
$N = 20$	19.9%	4.9%
$N = 50$	17.5%	3.6%
$K = 20$	20.0%	4.7%
$N = 10$	19.7%	6.5%
$N = 20$	21.2%	4.2%
$N = 50$	19.0%	2.4%

Tableau 5-3: Écarts de coûts entre les échéanciers de référence agrégés protégés avec les réserves de capacité optimales et les échéanciers désagrégés

	Moyenne de $E0(\text{coût}\%)$	Écart type de $E0(\text{coût}\%)$	Moyenne de $E'0(\text{coût}\%)$	Écart type de $E'0(\text{coût}\%)$
$K = 3$	-0.6%	3.7%	0.0%	0.1%
$N = 10$	0.2%	1.4%	0.0%	0.1%
$N = 20$	-0.4%	1.6%	0.0%	0.1%
$N = 50$	-1.5%	6.0%	0.0%	0.2%
$K = 10$	0.0%	0.7%	0.0%	0.1%
$N = 10$	-0.1%	0.4%	0.0%	0.1%
$N = 20$	-0.1%	0.5%	0.0%	0.1%
$N = 50$	0.1%	1.0%	0.0%	0.2%
$K = 20$	0.1%	0.4%	0.0%	0.1%
$N = 10$	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%
$N = 20$	0.0%	0.3%	0.0%	0.1%
$N = 50$	0.2%	0.5%	0.1%	0.1%

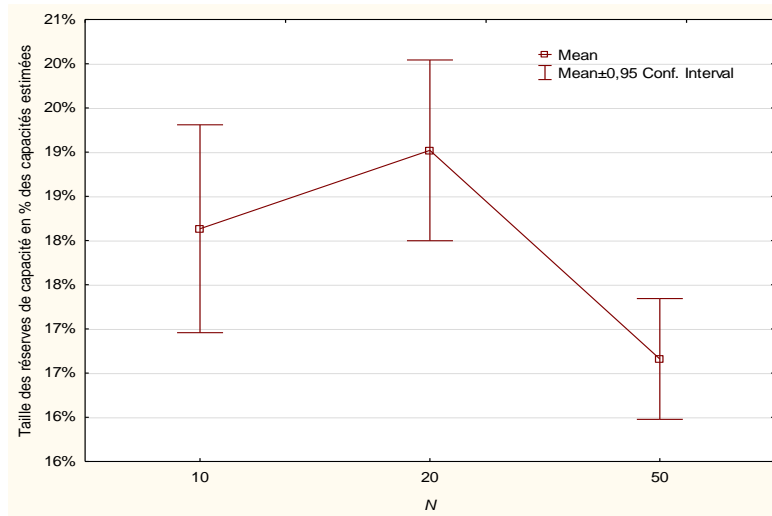


Figure 5-5: Graphe des valeurs moyennes des tailles des réserves de capacités regroupées selon N

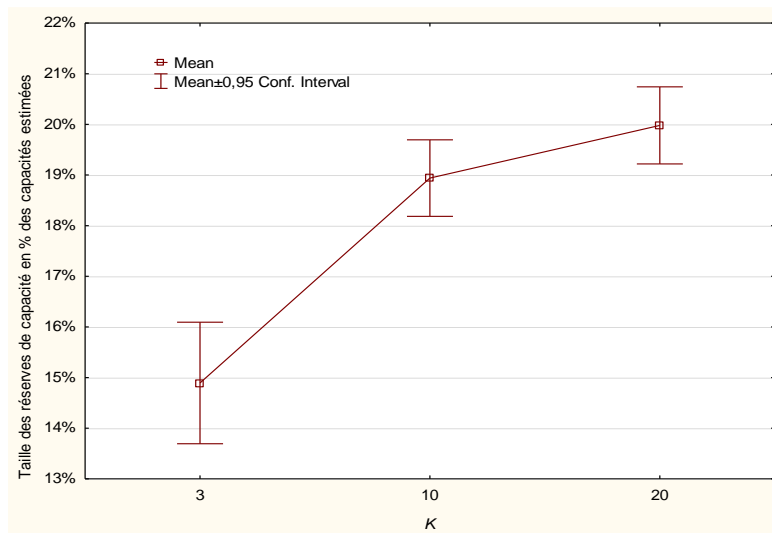


Figure 5-6: Graphe des valeurs moyennes des tailles des réserves de capacités regroupées selon K

Comme décrit dans la Figure 5-4, nous avons appliqué pour chaque groupe d'instances caractérisé par le même nombre de groupes de ressources K la taille moyenne sur ce groupe des réserves de capacité optimales trouvées avec la procédure Proc. Les tailles des réserves de capacité sont donc les suivantes : 14.9% pour le groupe d'instances G_3 , 18.9% pour le groupe d'instances G_{10} et 20.0% pour le groupe d'instances G_{20} (voir Tableau 5-2). Les résultats de l'application de ces réserves de capacité moyennes et la résolution du modèle RCCP de base (4.1-

4.23) sont rapportés dans le Tableau 5-4. En comparant aux résultats avant l'application des réserves de capacité présentés au Tableau 5-1, nous observons que la stratégie d'introduction des réserves réduit considérablement les écarts entre les coûts estimés par les échéanciers agrégés et désagrégés notamment quand le nombre de groupes de ressources est important. Comme pour le modèle RCCP de base non protégé, les écarts de coûts calculés avec la mesure $E0(\text{coût}\%)$ sont plus importants et dispersés quand le nombre de groupes de ressources est réduit. Ceci est dû aux valeurs réduites des coûts par rapport aux exigences totales. La mesure $E'0(\text{coût}\%)$ qui rapporte les écarts de coûts aux exigences totales en ressources permet de relativiser ces écarts.

Tableau 5-4: Écarts de coûts entre les échéanciers de référence agrégés protégés et les échéanciers de référence désagrégés

	Moyenne de $E0(\text{coût}\%)$	Écart type de $E0(\text{coût}\%)$	Moyenne de $E'0(\text{coût}\%)$	Écart type de $E'0(\text{coût}\%)$
$K = 3$	16.3%	71.0%	0.2%	3.1%
$N = 10$	4.8%	38.1%	-0.1%	3.6%
$N = 20$	-0.3%	55.5%	-0.1%	3.3%
$N = 50$	44.5%	97.8%	0.8%	2.4%
$K = 10$	0.5%	9.0%	0.0%	2.3%
$N = 10$	-0.6%	7.0%	-0.2%	2.3%
$N = 20$	-1.4%	8.7%	-0.5%	2.3%
$N = 50$	4.7%	10.6%	0.8%	1.8%
$K = 20$	0.0%	4.2%	-0.1%	2.0%
$N = 10$	0.5%	4.3%	0.1%	2.4%
$N = 20$	-0.9%	3.9%	-0.5%	1.8%
$N = 50$	0.8%	4.4%	0.2%	1.3%

Afin de mesurer l'impact de l'imprécision des données par rapport à la prédiction des tailles des réserves de capacité, nous avons calculé pour chaque instance l'effet d'une réduction additionnelle de 1% de la capacité sur les écarts de coûts avec le modèle désagrégé. Afin d'illustrer la démarche suivie, supposons que la taille optimale de la réserve de capacité est de 18% de la capacité initiale. Nous avons alors testé les tailles suivantes des réserves de capacité : 18%-5%, 18%-4%, ...18%+5%, et nous avons calculé à chaque fois l'écart de coût avec le modèle désagrégé. Nous avons ensuite calculé la moyenne de l'évolution de cet écart quand on

augmente la taille de la réserve de 1% par rapport à la capacité initiale. Les résultats moyens sont rapportés dans le Tableau 5-5. Nous observons qu'une petite imprécision dans l'estimation de la taille des réserves de capacité n'a pas un grand impact sur les estimations de coûts pour les instances dont K est important. À noter que pour les instances où K est petit, l'évolution plus importante des écarts de coûts est due aux coûts très réduits par rapport aux exigences totales en ressources. En effet, la mesure utilisée $E0(\text{coût}\%)$ ne rapporte pas les écarts de coûts aux exigences totales en ressources.

Sur la base de ces résultats ainsi que l'observation de la décroissance de la pente de la courbe sur la Figure 5-6, nous suggérons utiliser la même taille des réserves de capacité sur toutes les instances de projet caractérisées par un nombre de groupes de ressources supérieur à 20. Il est mieux cependant de valider cette suggestion par des tests additionnels.

Tableau 5-5: Évolution des écarts de coûts en appliquant une réduction supplémentaire de 1% de la capacité

	Moyenne de l'évolution de $E0(\text{coût}\%)$	Écart type de l'évolution de $E0(\text{coût}\%)$
$K = 3$	8.8%	10,0%
$K = 10$	2.2%	1.1%
$K = 20$	1.1%	0.6%

Pour conclure cette section, nous avons présenté la stratégie adoptée pour définir les tailles adéquates des réserves de capacité à appliquer aux périodes agrégées dans l'approche proactive. Ces réserves sont uniquement basées sur le paramètre du nombre de groupes de ressources. Ces réserves de capacité ont pour objectif de contrebalancer la sous-estimation des coûts de projets dans les niveaux de planification agrégés causée par l'incertitude liée à l'agrégation des capacités de ressources. La prochaine section présente les résultats numériques de l'analyse expérimentale basée sur la simulation qui va évaluer la robustesse et la performance des échéanciers de référence tactiques générés à l'aide de l'approche proactive dans un contexte incertain.

5.4 Résultats des tests expérimentaux

Le même cadre expérimental décrit dans le chapitre précédent pour tester le modèle *time-driven* RCCP de base est repris pour tester le modèle *time-driven* RCCP robuste/proactif. Ce dernier est nommé comme suit :

AgR2 : Modèle *time-driven* RCCP basé sur l'introduction des réserves de capacité au modèle de base Ag2.

Ainsi, pour chaque instance de l'ensemble des 450 instances de projet, 100 scénarios de projet sont simulés en tirant des valeurs aléatoires des charges des lots de travaux à partir de leurs distributions triangulaires, avec le paramètre de variabilité fixé à $\pm 10\%$. Les mêmes scénarios de projet sont simulés pour le modèle robuste ainsi que le modèle de base et le modèle désagrégé. À noter que les mêmes tailles de réserves de capacité (en pourcentage de la capacité sur la période agrégée) sont appliquées tout au long de l'approche réactive à horizon roulant aux différents points de décision.

Les Tableau 5-6 et Tableau 5-7 comparent le modèle proactif avec le modèle RCCP de base ainsi que le modèle désagrégé du point de vue de la robustesse de la qualité des échéanciers de référence. La robustesse est mesurée à l'aide de la fonction de dépassement de coût $E(\text{coût}\%)$ dans le Tableau 5-6 et à l'aide de la fonction de dépassement de coût relatif $E'(\text{coût}\%)$ dans le Tableau 5-7. Nous constatons l'amélioration notable de la robustesse dans le modèle robuste comparativement au modèle de base. Le modèle désagrégé reste cependant le plus robuste étant donné l'absence de l'incertitude liée à l'agrégation. Cependant, les variations de coûts dans l'approche proactive sont comparables à celles du modèle désagrégé, en particulier pour les instances caractérisées par un grand nombre de groupes de ressources ($K = 20$) et quand on rapporte les variations de coût aux exigences globales avec la fonction $E'(\text{coût}\%)$.

Tableau 5-6: Résultats moyens de l'évaluation de la robustesse des modèles avec $E(\text{coût}\%)$

	AgR2		Ag2		Desg2	
	Moy. de $E(\text{coût}\%)$	ET. de $E(\text{coût}\%)$	Moy. de $E(\text{coût}\%)$	ET. de $E(\text{coût}\%)$	Moy. de $E(\text{coût}\%)$	ET. de $E(\text{coût}\%)$
$K = 3$	48.3%	90.5%	781.1%	4284.7%	4.7%	15.5%
$N = 10$	25.7%	48.2%	151.2%	235.0%	3.7%	7.7%
$N = 20$	62.5%	105.8%	691.3%	3849.2%	6.4%	13.1%
$N = 50$	56.8%	102.9%	1500.8%	6325.5%	4.0%	22.3%
$K = 10$	7.0%	11.1%	74.2%	77.3%	-1.5%	7.3%
$N = 10$	4.7%	8.7%	35.0%	21.6%	0.3%	0.5%
$N = 20$	8.5%	11.5%	58.4%	37.8%	0.6%	1.0%
$N = 50$	7.8%	12.7%	129.1%	106.6%	-5.3%	11.8%
$K = 20$	3.2%	4.4%	31.1%	17.4%	-0.8%	3.1%
$N = 10$	2.0%	4.2%	16.7%	6.6%	0.2%	0.3%
$N = 20$	3.8%	3.5%	26.1%	5.5%	0.1%	0.5%
$N = 50$	3.8%	5.0%	50.4%	15.0%	-2.6%	4.8%

Tableau 5-7: Résultats moyens de l'évaluation de la robustesse des modèles avec $E'(\text{coût}\%)$

	AgR2		Ag2		Desg2	
	Moy. de $E'(\text{coût}\%)$	ET. de $E'(\text{coût}\%)$	Moy. de $E'(\text{coût}\%)$	ET. de $E'(\text{coût}\%)$	Moy. de $E'(\text{coût}\%)$	ET. de $E'(\text{coût}\%)$
$K = 3$	2.2%	3.0%	7.3%	3.2%	0.2%	0.3%
$N = 10$	2.2%	3.4%	7.7%	4.0%	0.3%	0.2%
$N = 20$	2.4%	3.3%	7.2%	2.9%	0.2%	0.2%
$N = 50$	2.0%	2.2%	6.9%	2.4%	0.0%	0.4%
$K = 10$	1.5%	2.3%	9.4%	2.2%	-0.3%	1.9%
$N = 10$	1.4%	2.5%	8.9%	2.8%	0.1%	0.2%
$N = 20$	2.0%	2.3%	10.0%	2.1%	0.1%	0.4%
$N = 50$	1.0%	1.8%	9.2%	1.5%	-1.2%	3.1%
$K = 20$	1.3%	1.8%	9.4%	2.1%	-0.2%	1.0%
$N = 10$	1.1%	2.4%	8.2%	2.6%	0.1%	0.2%
$N = 20$	1.8%	1.6%	10.0%	1.6%	0.1%	0.2%
$N = 50$	1.1%	1.4%	10.2%	1.3%	-0.8%	1.6%

Pour analyser la performance finale de l'approche proactive, nous analysons les coûts des échéanciers réalisés. Nous comparons ainsi l'approche proactive AgR2 avec le modèle de base Ag2 et le modèle désagrégé Desg2 par rapport aux coûts dans les échéanciers réalisés. Pour ce faire, nous utilisons les mesures suivantes :

$$E1(\text{coût}\%) = \text{moy}[(\text{coût}_{AgR2}^{rl} - \text{coût}_{Desg2}^{rl}) / \text{coût}_{Desg2}^{rl}]$$

$$E2(\text{coût}\%) = \text{moy}[(\text{coût}_{AgR2}^{rl} - \text{coût}_{Ag2}^{rl}) / \text{coût}_{Ag2}^{rl}].$$

$E1(\text{coût}\%)$ correspond à la mesure introduite au chapitre précédent pour la comparaison avec le modèle désagrégé et $E2(\text{coût}\%)$ est une mesure équivalente pour comparer avec le modèle agrégé de base. Les résultats sont rapportés dans le Tableau 5-8. Nous utilisons également les mesures de comparaison des coûts rapportés aux exigences globales :

$$E'1(\text{coût}\%) = \text{moy}(\text{coûtRel}_{AgR2}^{rl} - \text{coûtRel}_{Desg2}^{rl})$$

$$E'2(\text{coût}\%) = \text{moy}(\text{coûtRel}_{AgR2}^{rl} - \text{coûtRel}_{Ag2}^{rl})$$

Les résultats relatifs sont rapportés dans le Tableau 5-9. Nous constatons que nous obtenons approximativement les mêmes coûts dans les échéanciers réalisés, que nous appliquons la stratégie des réserves de capacité ou non. En d'autres termes, nous générons des estimations de coûts plus réalistes dans la phase de planification avec l'approche proactive AgR2 et finissons avec des coûts finaux similaires après la réalisation du projet. Quant à la comparaison avec le modèle désagrégé, ce dernier permet d'obtenir les coûts finaux les plus réduits tout en étant comparables aux coûts finaux des modèles agrégés. À noter que les écarts plus importants relevés pour le groupe d'instances G_3 dans le Tableau 5-8 sont dus aux coûts très réduits comparativement aux exigences globales. Rapporter les écarts de coûts aux exigences globales permet de régler ce problème comme le montre le Tableau 5-9.

Tableau 5-8: Comparaison des coûts des échéanciers réalisés sans rapporter aux exigences globales en ressources

	AgR2 vs. Ag2		AgR2 vs. Desg2	
	Moy. $E2(\text{coût}\%)$	ET. $E2(\text{coût}\%)$	Moy. $E1(\text{coût}\%)$	ET. $E1(\text{coût}\%)$
$K = 3$	5.9%	78.3%	255.8%	1710.2%
$N = 10$	20.4%	134.0%	35.7%	131.4%
$N = 20$	-2.0%	13.8%	498.3%	2811.2%
$N = 50$	-0.8%	12.2%	233.4%	929.3%
$K = 10$	0.3%	3.1%	7.0%	5.5%
$N = 10$	0.1%	1.9%	3.5%	2.7%
$N = 20$	0.2%	2.9%	6.1%	4.0%
$N = 50$	0.7%	4.1%	11.3%	5.9%
$K = 20$	0.2%	1.2%	3.2%	2.3%
$N = 10$	0.1%	0.9%	1.9%	1.6%
$N = 20$	0.1%	0.8%	2.9%	1.8%
$N = 50$	0.3%	1.8%	5.0%	2.2%

Tableau 5-9: Comparaison des coûts des échéanciers réalisés en rapportant aux exigences globales en ressources

	AgR2 vs. Ag2		AgR2 vs. Desg2	
	Moy. $E'2(\text{coût}\%)$	ET. $E'2(\text{coût}\%)$	Moy. $E'1(\text{coût}\%)$	ET. $E'1(\text{coût}\%)$
$K = 3$	0.0%	1.0%	2.1%	1.2%
$N = 10$	0.1%	1.2%	1.8%	1.3%
$N = 20$	-0.1%	0.9%	2.0%	1.2%
$N = 50$	0.1%	0.9%	2.5%	1.1%
$K = 10$	0.1%	0.7%	1.5%	0.8%
$N = 10$	0.0%	0.7%	1.2%	0.8%
$N = 20$	0.0%	0.8%	1.6%	0.9%
$N = 50$	0.2%	0.7%	1.7%	0.7%
$K = 20$	0.1%	0.5%	1.3%	0.7%
$N = 10$	0.0%	0.5%	1.0%	0.8%
$N = 20$	0.1%	0.4%	1.3%	0.8%
$N = 50$	0.1%	0.5%	1.4%	0.5%

5.4.1 Impact du niveau de variabilité des charges de travail sur les résultats

Dans cette sous-section, nous faisons varier le niveau d'incertitude dans les charges de travail durant les simulations afin d'en analyser l'impact sur la robustesse et la performance de l'approche proactive. Quatre niveaux d'incertitude sont testés, à savoir $\pm 0\%$, $\pm 10\%$, $\pm 25\%$ et $\pm 50\%$. Les instances testées sont les 50 plus grandes instances ($K = 20$ et $N = 50$). Le même cadre expérimental est utilisé et 100 scénarios de projet sont simulés pour chaque instance et niveau d'incertitude.

Le Tableau 5-10 rapporte les résultats moyens du calcul de la robustesse de l'approche proactive AgR2 pour les différents niveaux de variabilité en se basant sur les deux mesures $E(\text{coût}\%)$ et $E'(\text{coût}\%)$. Nous observons que la robustesse des échéanciers de référence proactifs est peu impactée par l'incertitude dans les charges de travail pour les niveaux inférieurs à $\pm 25\%$ avec des variations de coûts moyennes inférieures à 4.4%. Pour le niveau d'incertitude $\pm 50\%$, nous constatons une légère augmentation dans les variations de coût. Cependant, ce niveau d'incertitude est rarement atteint en pratique. Aussi, par comparaison avec le modèle de base Ag2 (voir chapitre précédent à la section 4.5.2), la robustesse est grandement améliorée pour tous les niveaux d'incertitude (variations moyennes entre 4.2%-6.6% au lieu de 50.4%-53.6%).

Tableau 5-10: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur la robustesse du modèle proactif

Incertainité dans les charges de travail	Mesure de robustesse $E(\text{coût}\%)$		Mesure de robustesse $E'(\text{coût}\%)$	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
$\pm 0\%$	4.2%	5.1%	1.2%	1.4%
$\pm 10\%$	3.8%	5.0%	1.1%	1.4%
$\pm 25\%$	4.3%	4.8%	1.2%	1.3%
$\pm 50\%$	6.6%	4.9%	1.9%	1.3%

Dans le Tableau 5-11, nous comparons l'approche proactive AgR2 et le modèle déterministe de base Ag2 relativement aux coûts dans les échéanciers réalisés, et ce pour tous les niveaux d'incertitude des charges de travail. Nous constatons que nous obtenons à peu près les mêmes

coûts réalisés sur tous les niveaux. Rappelons que les coûts réalisés du modèle déterministe sont eux-mêmes comparables à ceux du modèle désagrégé Desg2. Nous pouvons ainsi conclure que le modèle proactif obtient de bonnes performances finales, quel que soit le niveau de variabilité des charges de travail.

Tableau 5-11: Influence du niveau de variabilité des charges de travail sur les écarts entre les coûts réalisés par le modèle proactif AgR2 et le modèle déterministe Ag2

Incertitude dans les charges de travail	$E2(\text{coût}\%)$		$E'2(\text{coût}\%)$	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
$\pm 0\%$	-0.1%	2.2%	0.0%	0.6%
$\pm 10\%$	0.3%	1.8%	0.1%	0.5%
$\pm 25\%$	0.4%	1.6%	0.1%	0.5%
$\pm 50\%$	0.7%	1.4%	0.2%	0.4%

5.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une approche de planification proactive qui résout le problème *time-driven* RCCP sous incertitude. L'approche est basée sur une technique d'introduction de réserves de capacités sur les périodes agrégées en réduisant les niveaux des capacités d'un pourcentage adéquat. La taille adéquate des réserves de capacité pour les instances caractérisées par un nombre de groupes de ressources supérieur à 20 est de 20% de la capacité originale. Ce résultat dépend cependant de l'hypothèse qu'on désagrège les périodes par un facteur de 4 lorsque nous passons du niveau tactique au niveau tactique/opérationnel. Des tests sont donc requis pour vérifier comment le facteur de désagrégation impacte les tailles des réserves de capacité.

La robustesse des plans tactiques a été grandement améliorée par cette approche proactive comparativement au modèle de base déterministe. Notamment, les variations de coûts sur les grandes instances ($K = 20$ et $N = 50$) sont passées de l'ordre de 50% pour le modèle de base à l'ordre de 4% pour le modèle proactif. La robustesse du modèle proactif est aussi comparable à celle du modèle désagrégé où l'incertitude liée à l'agrégation est absente. Une légère

augmentation dans les variations de coût du modèle proactif est relevée au niveau d'incertitude le plus élevé des charges de travail. Ce niveau d'incertitude est cependant rarement atteint en pratique. Quant à la performance finale du projet, le modèle proactif permet d'obtenir des coûts réalisés similaires au modèle de base et comparables au modèle désagrégé. Nous améliorons ainsi la robustesse sans impacter la performance finale en termes de coûts réalisés.

CHAPITRE 6 APPROCHES DE PLANIFICATION PROACTIVE POUR LE PROBLÈME *RESOURCE-DRIVEN* RCCP SOUS INCERTITUDE

Dans ce chapitre, nous proposons et comparons un ensemble d’approches de planification proactive destinées à la variante *resource-driven* du problème RCCP sous incertitude, ayant pour but de maximiser la robustesse des dates jalons de l’échéancier tactique. Les dates jalons considérées correspondent à la date d’échéance du projet ainsi que les dates de début de certains lots contractuels. Les approches proactives s’appuient sur le modèle RCCP de base à durées variables des périodes développé au Chapitre 4. Le chapitre est organisé comme suit. Nous commençons par définir le problème dans la section 6.1. Ensuite, dans la section 6.2, nous analysons les facteurs de risque pouvant influencer la robustesse des dates jalons de l’échéancier tactique. Dans la section 6.3, nous décrivons les approches proactives proposées. Nous présentons dans la section 6.4 les résultats des tests expérimentaux. Finalement, nous présentons dans la section 6.5 nos conclusions sur les approches proactives les plus efficaces dans l’anticipation des variations causées par les incertitudes étudiées.

6.1 Description du problème

Le problème traité dans ce chapitre est le *resource-driven* RCCP sous incertitude destiné au niveau de planification tactique des grands projets d’ingénierie et de construction. Rappelons que les capacités des ressources sont supposées fixes dans cette variante du problème. Les données considérées incertaines sont les mêmes que celles considérées dans la variante *time-driven* du problème RCCP traitée au chapitre précédent, à savoir les charges de travail stochastiques et l’incertitude liée à l’agrégation des estimations de capacités de ressources sur des périodes étendues. De même, le nombre de périodes détaillées doit refléter le niveau de détail requis pour le niveau inférieur dans la hiérarchie : le niveau opérationnel où les capacités sont considérées connues avec certitude.

La modélisation du problème s’appuie sur le modèle RCCP de base présenté au Chapitre 4 qui intègre différents niveaux d’agrégation. Toutefois, la fonction-objectif diffère. Ici, l’objectif est de maximiser la fonction de robustesse en considérant les données décrites plus haut incertaines alors que le modèle de base considère les données déterministes et minimise la durée du projet.

La fonction de robustesse réfère dans cette variante du problème au degré de respect des dates contractuelles importantes qu'on appelle les dates jalons. Ces dates incluent une date d'échéance prédéfinie du projet DE ainsi que les dates de début contractuelles de certains lots de travaux. Le non-respect de ces dates peut engendrer des coûts importants pour différentes raisons, comme les coûts de pénalité imposés par le client, les coûts liés au maintien d'équipements majeurs ou le manque à gagner causé par le retard du début des opérations.

Notons J l'ensemble des lots de travaux critiques et NJ le nombre de lots critiques. Ici, la criticité réfère à l'importance de respecter ou de minimiser les dépassements par rapport à la date de début du lot fixée dans l'échéancier de référence et non par rapport à leur contribution dans le respect de la date d'échéance du projet. La fonction de robustesse est définie comme l'opposé de la fonction de dépassement des jalons. La fonction de dépassement des jalons est exprimée comme suit :

$$E(tps) = \frac{1}{1+NJ} \cdot (E(Cmax^{rl} - DE)^+ + \sum_{j \in J} E(ts_j^{rl} - ts_j^{rf})^+).$$

Les acronymes rf et rl réfèrent respectivement à l'échéancier de référence et l'échéancier réalisé et E réfère à l'espérance mathématique. La partie positive d'une variable x est représentée par x^+ .

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la méthode préconisée pour l'optimisation des fonctions-objectif de robustesse dans la littérature est la proposition d'approches proactives basées sur l'ajout de sécurité dans l'échéancier de référence et l'évaluation par la suite de la fonction-objectif par simulation. Ainsi l'espérance mathématique correspondra à la moyenne sur toutes les répliques de simulation des scénarios de projet.

Dans ce chapitre, afin de proposer des approches proactives pertinentes, nous allons d'abord essayer de déterminer les facteurs qui exposent les dates jalons au risque de dépassement. Ensuite, nous pourrions proposer des approches proactives qui vont agir sur ces facteurs de risques et permettre ainsi de générer des échéanciers de référence robustes.

6.2 Détermination des facteurs de risque

Nous allons considérer que la date d'échéance de projet correspond à la date de début d'un lot fictif $N+1$ à charge requise nulle et dont les prédécesseurs sont les lots sans successeur. Ceci

permettra de traiter les lots critiques (LC) et la date d'échéance de projet de la même façon. Il existe deux raisons potentielles pouvant empêcher un lot de démarrer à la date voulue. Soit que la date de fin réelle d'un lot prédécesseur dépasse la date de début prévue du lot en question, ou qu'une ressource nécessaire à l'exécution du lot étudié n'est pas disponible à sa date de début prévue. On note cependant que cette deuxième éventualité est absente pour le lot fictif final. Un ensemble de situations problématiques pouvant entraîner ces deux éventualités ont été identifiées :

- Situation 1 : Un conflit de ressources entre le lot critique et un autre lot qui ne lui est pas relié par des relations de précédence (directes ou transitives).
- Situation 2 : Des retards cumulés tout au long d'un chemin menant au lot critique/fictif final.
- Situation 3 : Absence ou insuffisance des marges de temps entre les lots tout au long des chemins menant au lot critique/fictif final pour couvrir les retards des prédécesseurs transitifs et directs.
- Situation 4 : Absence de marge de ressources durant l'exécution des prédécesseurs transitifs ou directs du lot critique/fictif final pour couvrir l'augmentation de leurs charges de travail.
- Situation 5 : Capacité désagrégée nulle ou inférieure à la charge minimale requise à la date de début prévue du lot critique alors que la capacité agrégée estimée était suffisante pour le démarrage du lot en question.

À partir de ces points, nous avons défini les variables décrites dans le Tableau 6-1 qui permettent de mesurer des facteurs de risque potentiels. À noter que pour la dernière situation reliée à la désagrégation des capacités, nous émettons l'hypothèse qu'au niveau désagrégué, il existe toujours une capacité minimale suffisante au démarrage des lots, quel que soit le groupe de ressources ou le lot considéré. Ce facteur de risque n'est donc pas considéré.

Les variables et paramètres suivants ont été introduits afin de calculer les facteurs de risque potentiels présentés dans le Tableau 6-1. Nous définissons pour chaque lot $j \in J^+ = J \cup \{N+1\}$ l'ensemble Chm_j constitué de tous les chemins menant au lot j . Un chemin est lui-même un

ensemble constitué d'une succession de prédécesseurs transitifs du lot j depuis un lot sans prédécesseur jusqu'à un prédécesseur direct du lot j . Dans l'exemple illustré sur la Figure 6-1, nous avons $Chm_5 = \{\{1.3.4\}, \{2.4\}\}$. L'ensemble $Succ_i$ regroupe tous les successeurs directs d'un lot $i \in I$. La variable $slack_{i, chm}$ définit la marge de temps entre le lot i et son successeur direct sur le chemin chm . Ainsi, $slack_{i, chm} = ts_k - tf_i$ tel que $k = Succ_i \cap chm$. Sur l'exemple illustré, $slack_{2, \{2.4\}}$ représente la marge de temps devant le lot 2 sur le chemin $\{2.4\}$ menant au lot 5.

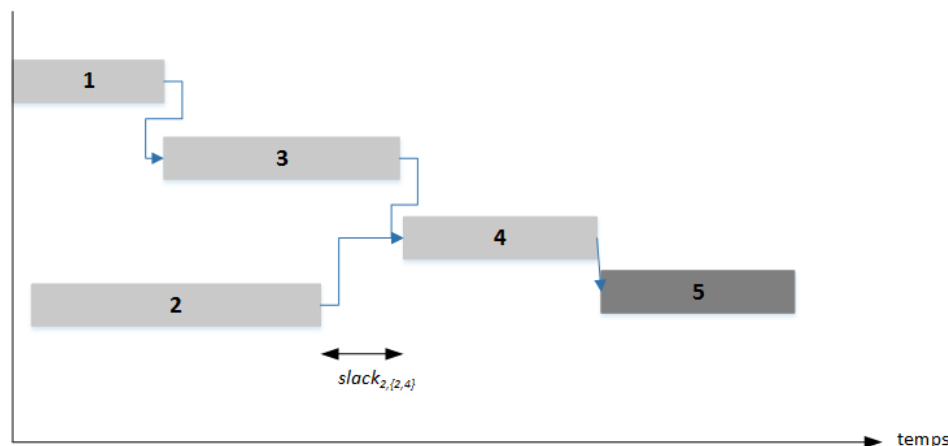


Figure 6-1: Exemple illustratif de chemins menant à un lot critique

Tableau 6-1: Variables représentant des facteurs de risque potentiels

Variables	Description
$Lmax_j$	Longueur maximale en nombre de lots des chemins menant au lot j
$Lmoy_j$	Longueur moyenne en nombre de lots des chemins menant au lot j
$nbLotsEnc_j$	Nombre de lots pouvant être exécutés en parallèle avec le lot $j \in J$ et partageant au moins un groupe de ressources avec le lot j
$minMargSlack_j$, $moyMargSlack_j$	Valeur minimale et moyenne sur l'ensemble Chm_j du rapport de la somme des marges de temps devant les lots sur le chemin $chm \in Chm_j$ rapportée à la durée minimale du chemin
$minMargRes_j$, $moyMargRes_j$	Valeur minimale et moyenne sur l'ensemble Chm_j du rapport de la somme des durées des lots sur le chemin $chm \in Chm_j$ rapportée à la durée minimale du chemin
$minMargTot_j$, $moyMargTot_j$	Valeur minimale et moyenne sur l'ensemble Chm_j du rapport de la somme des durées des lots et des marges de temps devant les lots sur le chemin $chm \in Chm_j$ rapportée à la durée minimale du chemin

Les variables $Lmax_j$ et $Lmoy_j$ représentent respectivement la longueur maximale et moyenne en termes de nombre de lots sur l'ensemble des chemins Chm_j . Ces variables sont reliées à la situation problématique 2. La variable $nbLotsEnc_j$ correspond au nombre de lots « encombrants » $i \in I$ vérifiant les conditions suivantes :

$$i \notin Chm_j, j \notin Pred_i, \exists r \in R : Qri * Qrj > 0, RD_i \leq lf_j - 1 \text{ et } lf_i \geq RD_j + 1.$$

Rappelons que RD_i correspond à la date de lancement du lot i et lf_i à la date de fin au plus tard du lot i . lf_i est calculée en se basant sur les calculs du plus long chemin à partir des durées minimales des lots. La variable $nbLotsEnc_j$ est reliée à la situation 1. En effet, l'hypothèse est que plus le nombre de ces lots « encombrants » est important, plus la chance de créer des conflits de ressources est grande. Les variables $minMargSlack_j$ et $moyMargSlack_j$ permettent de mesurer les marges de temps entre les lots sur les chemins menant au lot j . Elles sont reliées à la situation 3. Les variables $minMargRes_j$ et $moyMargRes_j$ sont reliées à la situation 4. En effet, plus les durées des lots sur les chemins se rapprochent de leurs durées minimales, plus grande est la charge à réaliser par unité de temps et plus petite est la marge de manœuvre en cas de charges réelles supérieures aux charges estimées. Finalement, les variables $minMargTot_j$ et $moyMargTot_j$ sont une combinaison des marges précédentes et sont donc reliées aux situations 3 et 4. Les différentes variables relatives aux marges sont calculées comme suit :

$$minMargSlack_j = \min_{chm \in Chm_j} \{(\sum_{i \in chm} slack_{i,chm}) / \sum_{i \in chm} Dmin_i\}.$$

$$moyMargSlack_j = \text{moy}_{chm \in Chm_j} \{(\sum_{i \in chm} slack_{i,chm}) / \sum_{i \in chm} Dmin_i\}.$$

$$minMargRes_j = \min_{chm \in Chm_j} \{(\sum_{i \in chm} (tf_i - ts_i)) / \sum_{i \in chm} Dmin_i\}.$$

$$moyMargRes_j = \text{moy}_{chm \in Chm_j} \{(\sum_{i \in chm} (tf_i - ts_i)) / \sum_{i \in chm} Dmin_i\}.$$

$$minMargTot_j = \min_{chm \in Chm_j} \{(\sum_{i \in chm} (tf_i - ts_i + slack_{i,chm})) / \sum_{i \in chm} Dmin_i\}.$$

$$moyMargTot_j = \text{moy}_{chm \in Chm_j} \{(\sum_{i \in chm} (tf_i - ts_i + slack_{i,chm})) / \sum_{i \in chm} Dmin_i\}.$$

6.2.1 Expérimentation

Afin de tester l'impact de ces facteurs de risque potentiels sur les dépassements réels, nous avons conduit les expérimentations suivantes. Nous avons résolu le modèle *resource-driven* RCCP de base présenté au Chapitre 4 pour générer un échéancier de référence puis nous avons conduit les expérimentations basées sur la simulation dans un environnement incertain afin de générer les échéanciers réalisés selon plusieurs scénarios de projet. Pour ce faire, nous avons repris le même cadre expérimental utilisé pour tester le modèle *resource-driven* RCCP de base (voir section 4.4 du Chapitre 4) avec les adaptations décrites dans la section 3.3.2.1 du Chapitre 3. Les expériences sont conduites sur les 450 instances test présentées au Chapitre 4. 100 scénarios sont simulés pour chaque instance. Le paramètre de variabilité des charges a été fixé à $\pm 20\%$.

Pour chaque instance test et chaque lot $j \in J^+$, nous avons calculé les différents facteurs de risque potentiels présentés ci-haut à l'issue de la génération de l'échéancier de référence. Ensuite, nous avons récupéré la moyenne des dépassements réels des dates de début des lots j à l'issue de la phase réactive. Ici, nous avons considéré que $DE = Cmax^{rf}$. Les graphes suivants tracent ces dépassements moyens en fonction des facteurs de risque potentiels. Chaque point sur les graphes correspond à un lot $j \in J^+$ d'une instance test donnée.

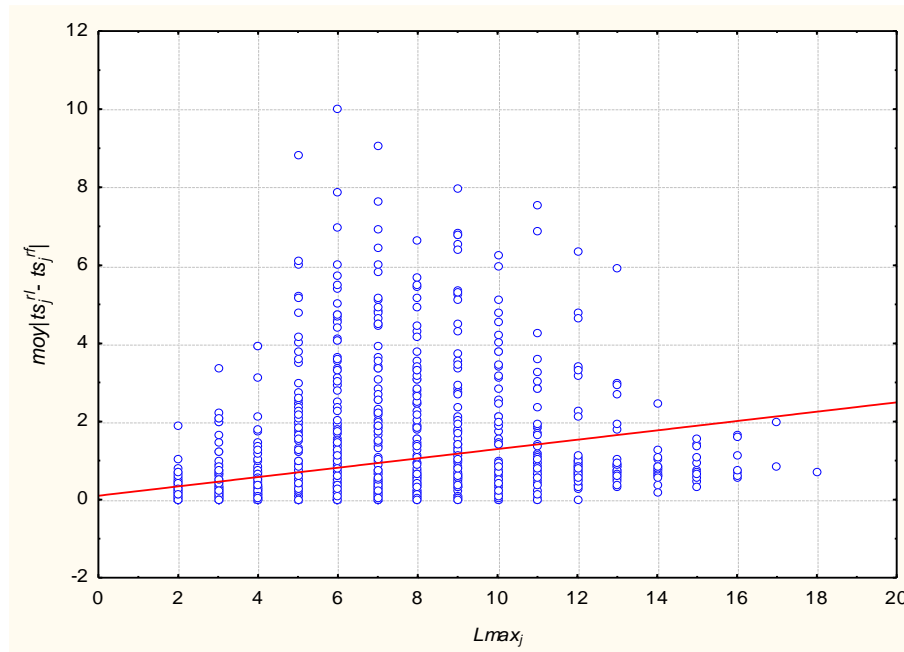


Figure 6-2: Dépassements moyens des jalons en fonction de $Lmax_j$

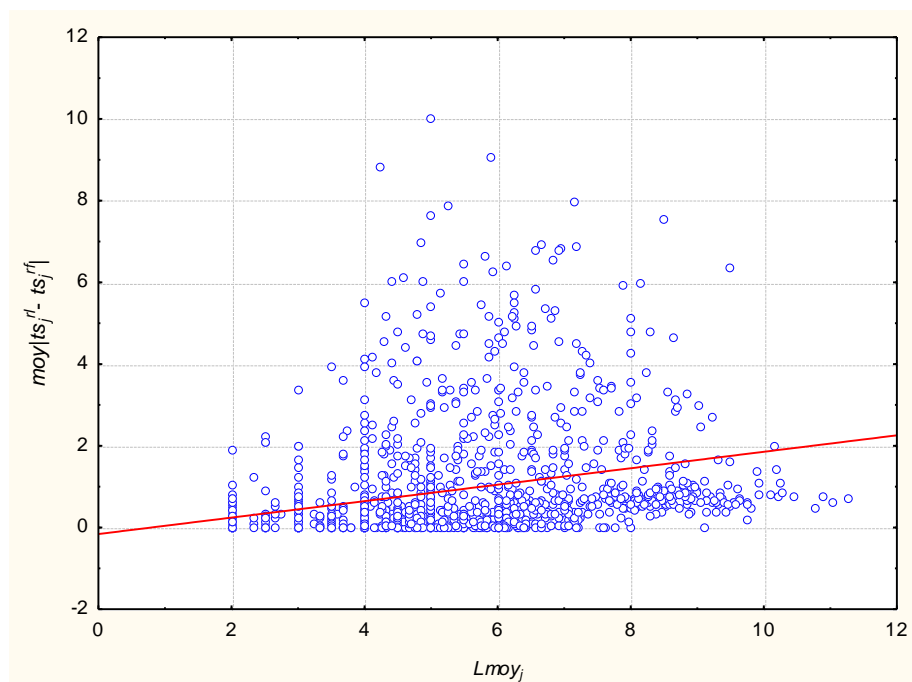


Figure 6-3: Dépassements moyens des jalons en fonction de $Lmoy_j$

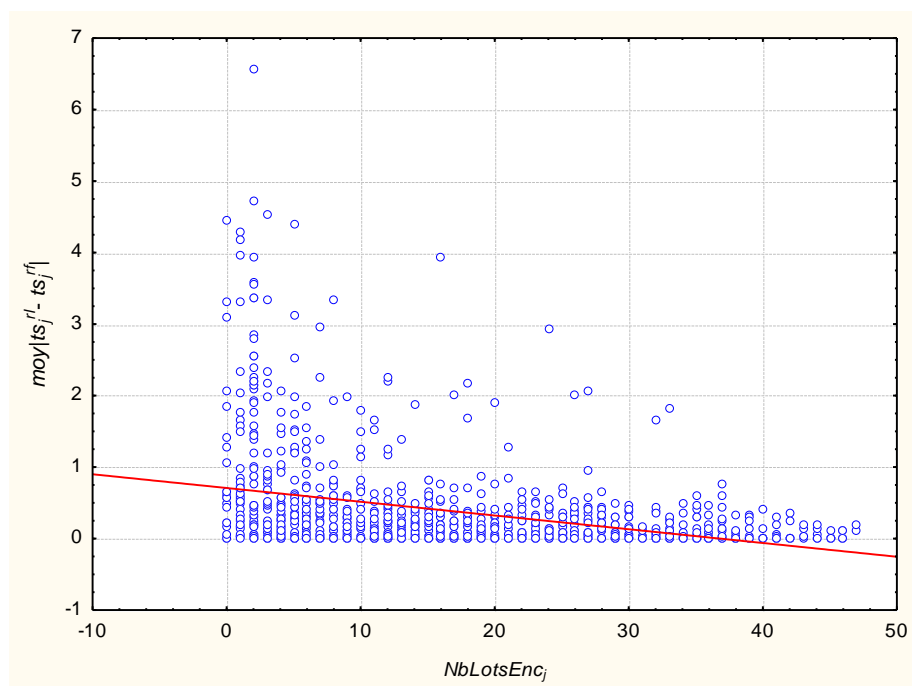


Figure 6-4: Dépassements moyens des dates de début des lots critiques en fonction de $nbLotsEnc_j$

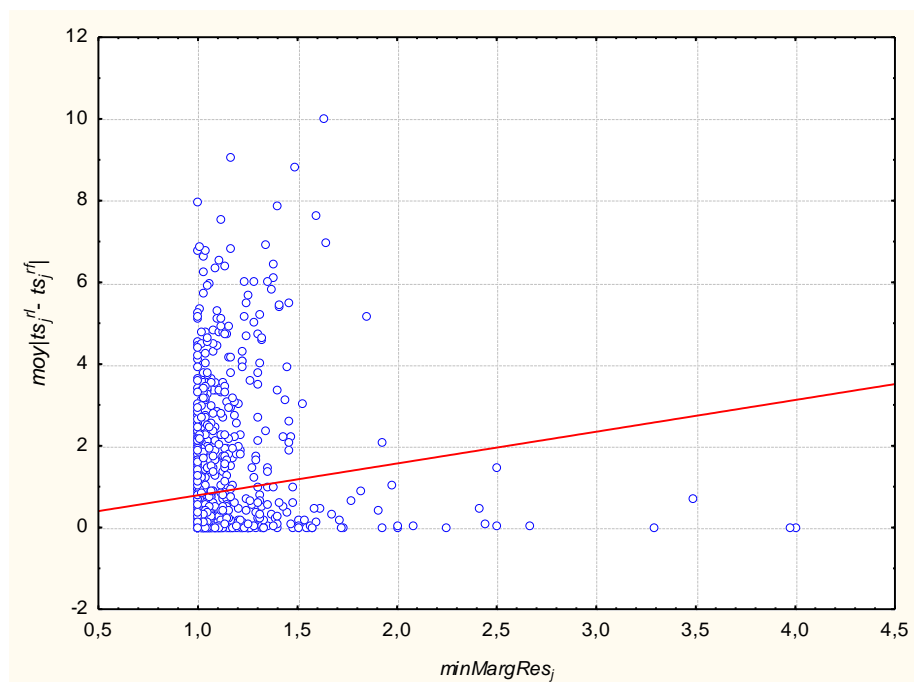


Figure 6-5: Dépassements moyens des jalons en fonction de $\min \text{MargRes}_j$

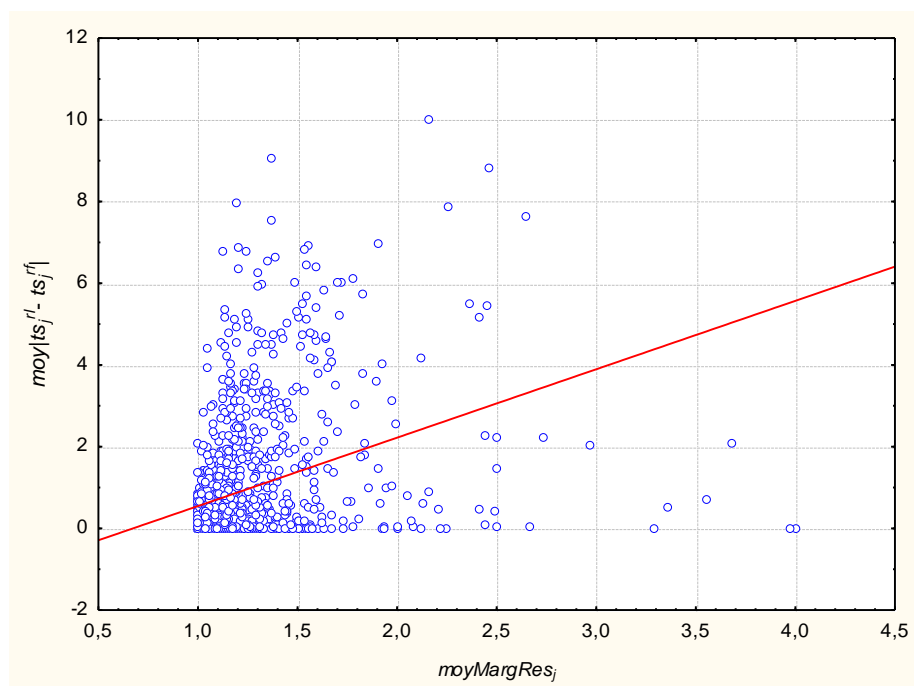


Figure 6-6: Dépassements moyens des jalons en fonction de $\text{moy} \text{MargRes}_j$

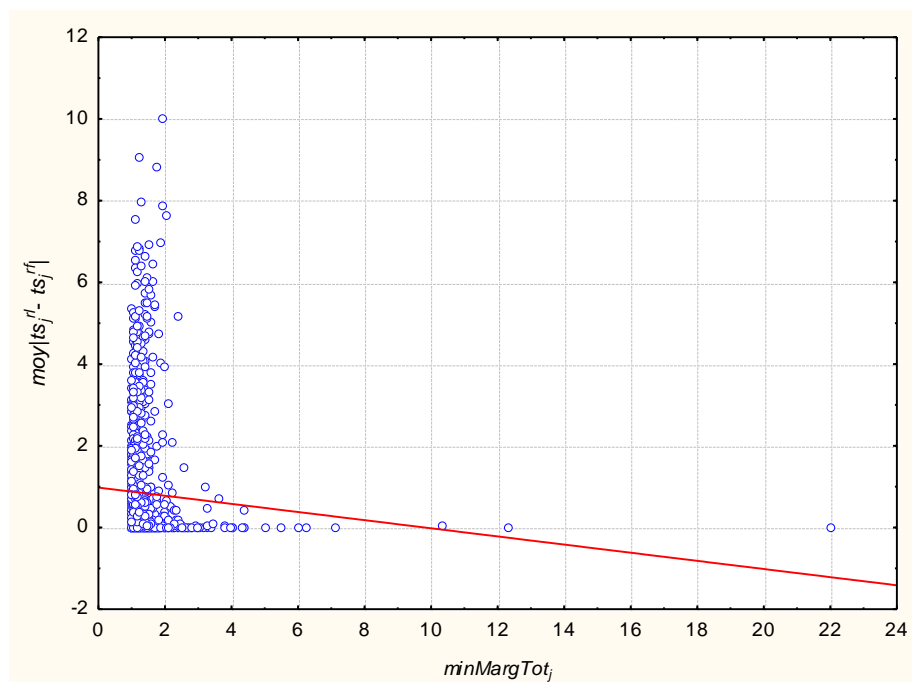


Figure 6-7: Dépassements moyens des jalons en fonction de $\min \text{MargTot}_j$

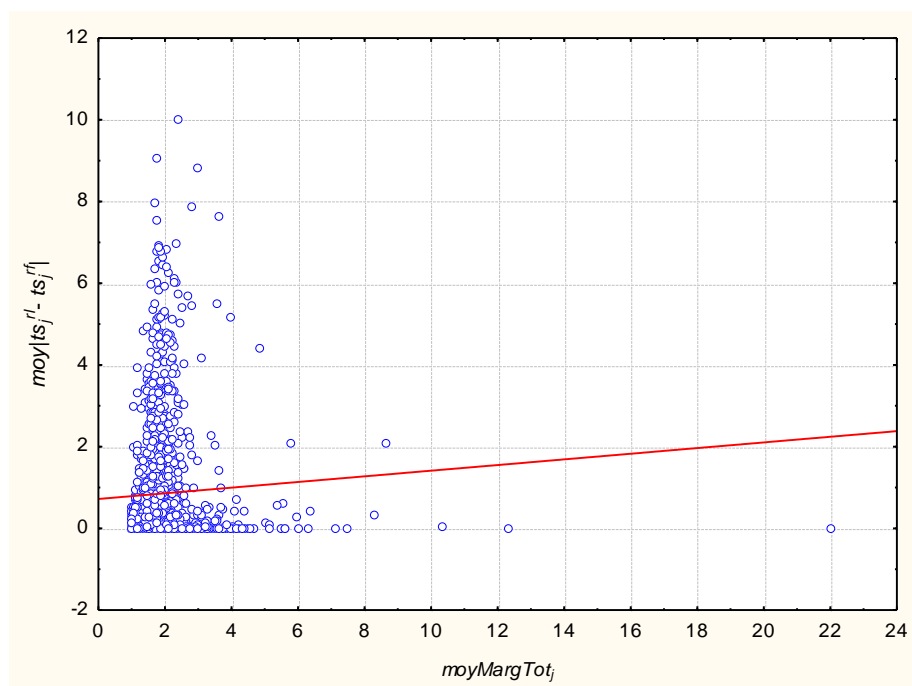


Figure 6-8: Dépassements moyens des jalons en fonction de $\text{moy} \text{MargTot}_j$

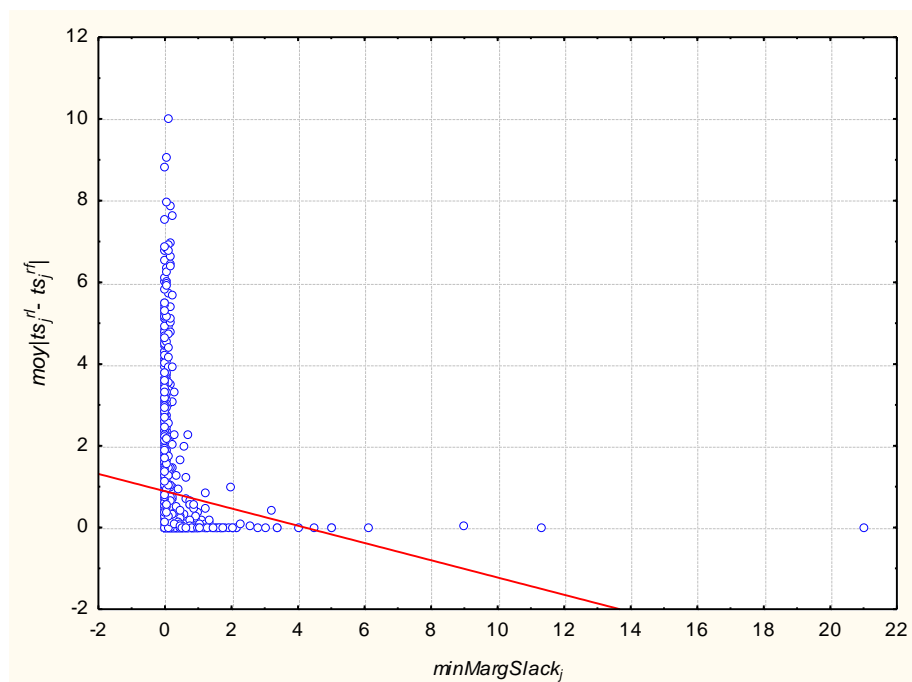


Figure 6-9: Dépassements moyens des jalons en fonction de $\min MargSlack_j$

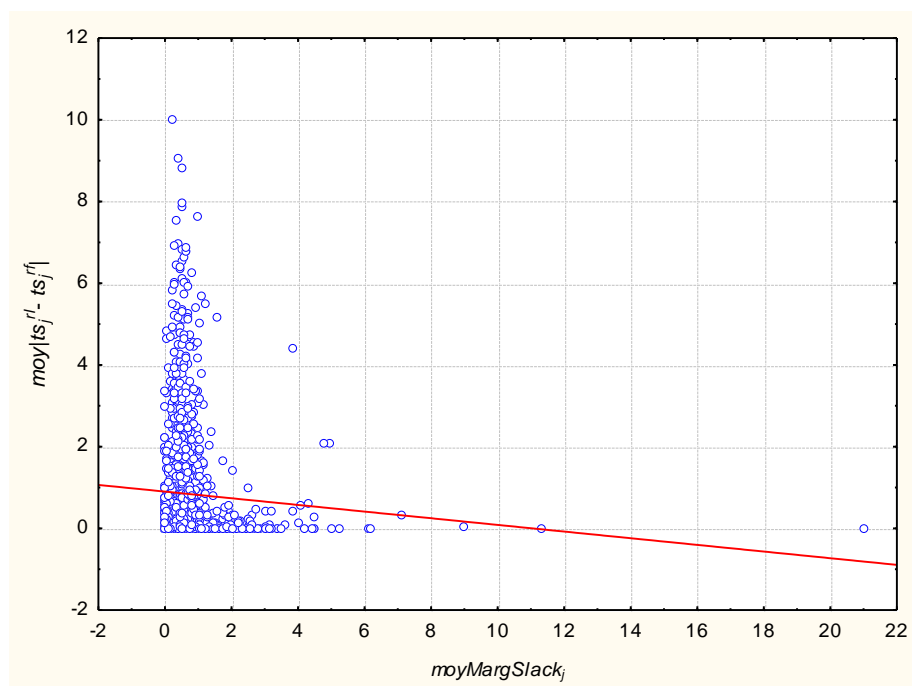


Figure 6-10: Dépassements moyens des jalons en fonction de $moy MargSlack_j$

À partir des graphes, nous constatons que les variables L_{max} et L_{moy} ne représentent pas des facteurs de risque pour les dépassements des dates critiques (Figure 6-2 et Figure 6-3). La

variable *nbLotsEnc* ne semble pas très précise pour détecter le nombre de lots encombrants puisque leur nombre peut approcher le nombre total de lots (Figure 6-4). Ce que nous pouvons toutefois constater c'est que l'augmentation du nombre de lots semble avoir un effet positif sur la stabilité des dates de début des LC (lots critiques). Concernant les variables basées sur le calcul des marges, celles basées sur les valeurs minimales sur les chemins (Figure 6-5, Figure 6-7 et Figure 6-9) sont plus significatives que les variables basées sur les moyennes (Figure 6-6, Figure 6-8 et Figure 6-10). La variable *minMargSlack* basée sur les marges de temps entre les lots est celle qui a l'effet le plus notable sur les dépassements, suivie de la variable *minMargTot* basée sur les deux types de marges (marges de durées et marges de temps entre les lots) et finalement la variable *minMargRes* basée uniquement sur les marges de durée.

Nous concluons donc que les variables *minMargSlack* et *minMargTot* sont les facteurs de risque les plus pertinents parmi ceux étudiés sur les dépassements réels. Ces variables sont basées sur les marges de temps, notamment celles placées entre les lots sur les chemins menant aux dates jalons. Dans la prochaine section, nous allons donc nous focaliser sur ces facteurs de risque afin de proposer des approches proactives pertinentes ayant pour objectif de maximiser la robustesse des dates jalons.

6.3 Description des approches proactives proposées

Nous proposons dans cette section un ensemble d'approches proactives destinées au problème *resource-driven* RCCP sous incertitude qui agissent sur les facteurs de risque pertinents relevés à la section précédente.

Ces approches sont décomposées en deux étapes. La première consiste à trouver la durée optimale de projet C_{max_0} en résolvant le modèle *resource-driven* RCCP de base. La solution générée correspond à l'échéancier initial. Ensuite, on fixe la date d'échéance du projet en augmentant légèrement la durée optimale du projet : $DE = 1.05 * C_{max_0}$ et on génère une nouvelle solution qui va protéger les dates jalons en s'assurant de ne pas dépasser la date d'échéance du projet. Cette deuxième solution correspond à l'échéancier de référence. La manière dont les dates jalons seront protégées va différencier les approches. La protection sera principalement axée sur

l'introduction de marges de temps à la lumière de l'analyse des facteurs de risque effectuée à la section précédente.

6.3.1 Approche proactive AgR_MgT%

Cette approche va agir sur le facteur de risque $minMargTot$. En effet, cette variable est corrélée négativement avec les dépassements des dates jalons (Figure 6-7). La signification de l'acronyme AgR_MgT% est la suivante : Ag réfère à Agrégé, R à Robuste, MgT à Marge Totale et % au fait qu'on rapporte la marge d'un chemin à sa durée minimale.

Étape 1 :

- Résolution du modèle de base Ag (voir Chapitre 4).
- Récupérer la valeur optimale de la durée du projet : $Cmax_0$.

Étape 2 : Résolution du modèle AgR_MgT% :

$$\text{Maximiser } minMargTot \quad (6.1)$$

Sous les contraintes suivantes :

(4.1) – (4.22) sans (4.14),

$$ts_{N+1} \leq 1.05 \cdot Cmax_0 \quad (6.2)$$

$$ts_{N+1} \geq tf_i \quad \forall i \in I \quad (6.3)$$

$$slack_{i, chm} = ts_k - tf_i \quad k = Succ_i \cap chm, \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j, i \in chm \quad (6.4)$$

$$margTot_{j, chm} = \sum_{i \in chm} (tf_i - ts_i + slack_{i, chm}) / \sum_{i \in chm} Dmin_i \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.5)$$

$$minMargTot \leq margTot_{j, chm} \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.6)$$

Rappelons que les variables y_{ext} reliées aux ressources non régulières sont imposées à 0 dans la variante *resource-driven* du problème RCCP. La contrainte (4.14) reliée au $Cmax$ est éliminée. Le $Cmax$ est calculé a posteriori de l'optimisation : $Cmax = \max_{i \in I} ts_i$.

6.3.2 Approche proactive AgR_MgSk%

Cette approche va agir sur le facteur de risque *minMargSlack*. En effet, cette variable est corrélée négativement avec les dépassements des dates jalons (Figure 6-9). La signification de l'acronyme AgR_MgSk% est la suivante : Ag réfère à Agrégé, R à Robuste, MgSk à Marge sous forme de Slack entre les lots et % au fait qu'on rapporte la marge d'un chemin à sa durée minimale.

Étape 1 : Résolution du modèle de base Ag et récupération de $Cmax_0$.

Étape 2 : Résolution du modèle AgR_MgSk% :

$$\text{Maximiser } minMargSlack \quad (6.7)$$

Sous les contraintes suivantes :

(4.1) – (4.22) sans (4.14),

(6.2) – (6.4),

$$margSlack_{j, chm} = \sum_{i \in chm} slack_{i, chm} / \sum_{i \in chm} Dmin_i \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.8)$$

$$minMargSlack \leq margSlack_{j, chm} \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.9)$$

6.3.3 Approche proactive AgR_MgSkCf%

Cette approche est une variante de l'approche précédente. Son principe est d'insérer des marges de temps plus importantes devant les derniers lots des chemins menant aux dates jalons en jouant sur les coefficients. En effet, les marges à la fin du chemin peuvent servir à protéger des retards cumulés sur les lots antérieurs alors que les marges situées au début du chemin ne vont protéger que les premiers lots. Donc, si ces premiers lots ne consomment pas ces marges, elles resteront inexploitées. Les coefficients sont établis en fonction des numéros des lots. En effet, dans les instances test, les réseaux d'antériorité sont acycliques et les lots sont numérotés avec un ordre topologique (un lot a toujours un numéro supérieur à ses prédécesseurs). L'acronyme Cf est rajouté dans l'appellation de l'approche pour référer à Coefficients.

Étape 1 : Résolution du modèle de base Ag et récupération de $Cmax_0$.

Étape 2 : Résolution du modèle AgR_MgSkCf% :

$$\text{Maximiser } \min MargSkCf \quad (6.10)$$

Sous les contraintes suivantes :

(4.1) – (4.22) sans (4.14),

(6.2) – (6.4),

$$margSkCf_{j, chm} = \sum_{i \in chm} \sqrt{i} \cdot slack_{i, chm} / \sum_{i \in chm} Dmin_i \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.11)$$

$$\min MargSkCf \leq margSkCf_{j, chm} \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.12)$$

6.3.4 Approche proactive AgR_MgSkFl%

Cette approche est également une variante de l'approche AgR_MgSk%. Son principe est de maximiser les marges de temps devant les lots précédant directement les dates jalons, qu'on appelle marges directes aux dates jalons, tout en rapportant à la durée minimale de tout le chemin menant au lot critique/fictif final. Ainsi, cette approche cherche à concentrer la marge de temps à la fin des chemins menant aux dates jalons et ignore les marges intermédiaires. L'acronyme Fl rajouté à l'appellation de l'approche correspond à Final en référence au lot final du chemin.

Étape 1 : Résolution du modèle de base Ag et récupération de $Cmax_0$.

Étape 2 : Résolution du modèle AgR_MgSkFl% :

$$\text{Maximiser } \min MargSkFl \quad (6.13)$$

Sous les contraintes suivantes :

(4.1) – (4.22) sans (4.14),

(6.2) – (6.4),

$$margSkFl_{j, chm} = slack_{i, chm} / \sum_{i \in chm} Dmin_i \quad i = Pred_j \cap chm, \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.14)$$

$$\min MargSkFl \leq margSkFl_{j, chm} \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.15)$$

6.3.5 Approche proactive AgR_MgSkFl

Cette approche est une variante de l'approche précédente : AgR_MgSk%. La différence réside dans le fait qu'on ne divise pas par la durée minimale des chemins. Cette approche va alors tendre à répartir les marges directes aux dates jalons de façon uniforme quel que soit l'emplacement de ces dates dans le réseau.

Étape 1 : Résolution du modèle de base Ag et récupération de $Cmax_0$.

Étape 2 : Résolution du modèle AgR_MgSkFl :

$$\text{Maximiser } minMargSkFl2 \quad (6.16)$$

Sous les contraintes suivantes :

(4.1) – (4.22) sans (4.14),

(6.2) – (6.4),

$$margSkFl2_{j, chm} = slack_{i, chm} \quad i = Pred_j \cap chm, \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.17)$$

$$minMargSkFl2 \leq margSkFl2_{j, chm} \quad \forall j \in J^+, chm \in Chm_j \quad (6.18)$$

6.3.6 Approche proactive AgR_MgCap

Cette approche n'est pas basée sur l'insertion de marges de temps, mais plutôt sur l'insertion de marges de capacité en réduisant les capacités d'un pourcentage de 5%.

Étape 1 : Résolution du modèle de base Ag et récupération de $Cmax_0$.

Étape 2 : Résolution du modèle AgR_MgCap :

$$\text{Minimiser } Cmax \quad (6.19)$$

Sous les contraintes suivantes :

(4.1) – (4.22),

$$Cmax \leq 1.05 \cdot Cmax_0 \quad (6.20)$$

$$\text{Contraintes (4.19) remplacées par : } y_{int_{rp}} \leq 0.95 \cdot K_{rp} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (6.21)$$

Le pourcentage de réduction de capacités de 5% a été choisi de façon à correspondre à l'ajout de 5% par rapport à la durée de projet optimale. Ce choix devrait permettre de trouver des solutions réalisables dans un contexte où les durées augmentent de façon proportionnelle à la charge. Les expérimentations vont permettre d'analyser l'impact de cette réduction dans le contexte du problème étudié.

6.3.7 Approche proactive AgR_MgCmax

Cette approche correspond à ajouter la marge accordée au projet en totalité à la fin du réseau afin de protéger uniquement la date d'échéance du projet. Ainsi une seule optimisation est effectuée pour trouver la durée optimale : C_{max0} . La solution initiale correspond à la solution de référence et la totalité de la marge ($5\% * C_{max0}$) est conservée pour protéger la date d'échéance de projet DE . Dans cette approche, les dates de début des lots critiques ne sont donc pas protégées.

6.3.8 Approche proactive AgR_Linear

Cette approche est une approche intuitive qui reflète ce que les gestionnaires tendent à faire dans la pratique. Elle consiste à réaliser une première optimisation pour trouver la durée optimale du projet : C_{max0} . Ensuite, on ajoute simplement 5% aux dates de début des lots critiques et à la date finale du projet ($C_{max} = 1.05 * C_{max0}$). Les autres dates ne sont pas modifiées. Dans cette approche, on ne s'occupe pas de la faisabilité de la solution de référence.

Nous récapitulons dans le Tableau 6-2 les différentes approches comparées.

Tableau 6-2: Récapitulatif des approches proactives

Approche proactive	Description
AgR_MgT%	Approche agrégée robuste basée sur la maximisation de la somme des durées des lots et des marges de temps devant les lots sur les chemins menant aux jalons rapportée à la durée minimale des chemins
AgR_MgSk%	Approche agrégée robuste basée sur la maximisation de la somme des marges de temps devant les lots sur les chemins menant aux jalons rapportée à la durée minimale des chemins
AgR_MgSkCf%	Approche agrégée robuste basée sur la maximisation de la somme pondérée par des coefficients des marges de temps devant les lots sur les chemins menant aux jalons rapportée à la durée minimale des chemins
AgR_MgSkFI%	Approche agrégée robuste basée sur la maximisation des marges de temps finales sur les chemins menant aux jalons rapportées aux durées minimales des chemins
AgR_MgSkFI	Approche agrégée robuste basée sur la maximisation des marges de temps finales sur les chemins menant aux jalons
AgR_MgCmax	Approche agrégée robuste basée sur l'introduction d'une marge de temps globale à la fin du projet (entre C_{max0} et DE)
AgR_Linear	Approche agrégée robuste basée sur la majoration des dates de début des lots critiques et de la date finale du projet de 5% par rapport à l'échéancier initial
AgR_MgCap	Approche agrégée robuste basée sur l'introduction de marges de capacité de 5%

6.4 Résultats des tests expérimentaux

6.4.1 Configuration

Les différentes approches qui sont comparées dans ce chapitre ont été testées sur le même bassin des 450 instances de projet présenté à la section 4.3.2 du Chapitre 4 avec toutefois les deux modifications suivantes :

- Génération des lots critiques en choisissant aléatoirement 10% des lots selon la loi uniforme.
- Imposition d'une valeur non nulle à la charge minimale Q_i^{min} qui doit être assignée à un lot durant son exécution sur une durée de 1 (semaine). Pour chaque lot i , Q_i^{min} a été fixée à

$5\% * Q_i^{max}$. Cette contrainte a été ajoutée pour éviter le cas où la ré-optimisation dans un point de décision de l'approche réactive déciderait de commencer un lot avec une charge nulle pour empêcher un dépassement par rapport à sa date de début prévue dans l'échéancier de référence.

Le même cadre expérimental utilisé pour tester le modèle *resource-driven* RCCP de base (voir section 4.4 du Chapitre 4) est repris avec les adaptations décrites dans la section 3.3.2.1 du Chapitre 3. 100 scénarios sont simulés pour chaque instance et pour chaque approche étudiée. Le paramètre de variabilité des charges a été fixé à $\pm 20\%$. Les résultats sont présentés dans ce qui suit.

6.4.2 Résultats de comparaison des approches proactives

Nous allons commencer par analyser l'impact des paramètres des instances N (nombre de lots) et K (nombre de groupes de ressources) sur la fonction de dépassement des jalons $E(tps)$ et ce quelle que soit l'approche utilisée AgR_MgT%, AgR_MgSk%, AgR_MgSkCf%, AgR_MgSkFl%, AgR_MgSkFl, AgR_MgCmax, AgR_Linear, AgR_MgCap ou le modèle de base Ag. Nous avons donc considéré les résultats de toutes ces approches pour la construction des graphes sur la Figure 6-11 et la Figure 6-12. Ces graphes représentent les valeurs moyennes ainsi que l'intervalle de confiance à 95% de la fonction de dépassement des jalons $E(tps)$ selon les valeurs des paramètres N et K respectivement. Nous constatons que les deux paramètres N et K ont un impact considérable sur les résultats. Plus le nombre de lots est important et le nombre de groupes de ressources est réduit, moins importants sont les écarts de temps, c'est-à-dire plus les dates jalons sont robustes. Les résultats de comparaison des différentes approches seront ainsi présentés pour la classe d'instances la plus robuste ($N = 50$ et $K = 3$) et la classe d'instances la moins robuste ($N = 10$ et $K = 20$). Nous présentons aussi les résultats pour la classe composée des plus grandes instances ($N = 50$ et $K = 20$) puisque nous nous intéressons aux grands projets.

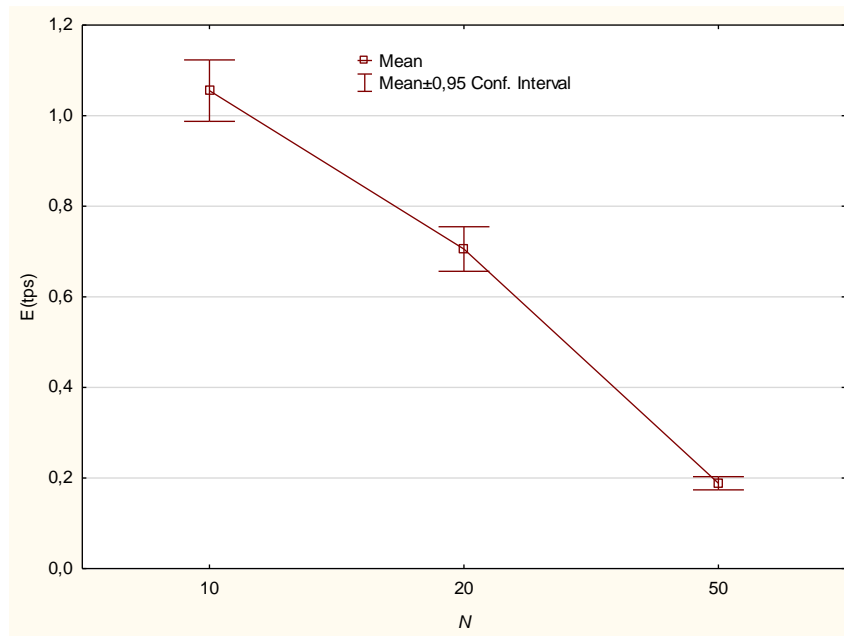


Figure 6-11: Influence du nombre de lots sur la fonction de dépassement des jalons

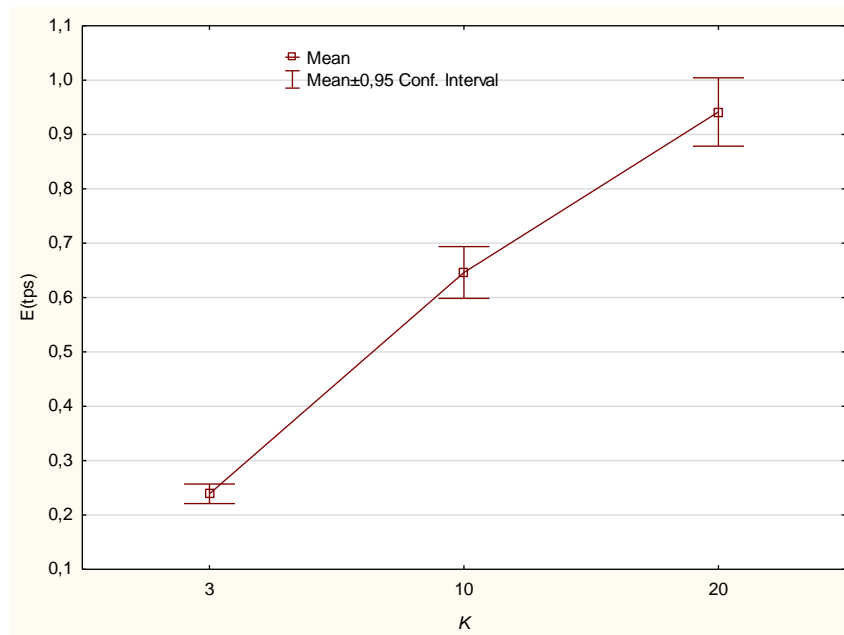


Figure 6-12: Influence du nombre de groupes de ressources sur la fonction de dépassement des jalons

En plus de l'évaluation de la fonction de dépassement des jalons $E(tps)$, d'autres mesures qui s'intéressent soit à la date finale du projet ou aux lots critiques sont utilisées pour évaluer et comparer les différentes approches. Les mesures évaluant la date finale sont les suivantes :

$Rep\%(E(Cmax) > 0)$: calcule le pourcentage de réplifications où l'on dépasse la date d'échéance de projet ;

$E_{max}(Cmax\%) = \max[(Cmax^{rl} - DE)/DE]$: évalue l'écart maximal sur toutes les réplifications de la durée de projet par rapport à la date d'échéance en pourcentage ; et

$E(Cmax) = moy((Cmax^{rl} - DE)^+)$: évalue le dépassement moyen par rapport à la date d'échéance sans pourcentage.

Les mesures suivantes s'intéressent plutôt aux lots critiques :

$E_{max}(LC) = \max(ts_j^{rl} - ts_j^{rf})$ et $E(LC) = moy((ts_j^{rl} - ts_j^{rf})^+)$: calculent respectivement la valeur maximale et moyenne sur tous les lots critiques $j \in J$ et toutes les réplifications des dépassements par rapport aux dates de début prévues des lots critiques.

Nous référons au pourcentage des lots critiques qui dépassent leur date de début prévue par l'acronyme : $JDp\%$. Ainsi, les mesures :

$Rep\%(JDp\% \leq 20\%)$, $Rep\%(40\% \leq JDp\% \leq 60\%)$ et $Rep\%(JDp\% \geq 80\%)$ réfèrent respectivement au pourcentage de réplifications où moins de 20%, entre 40% et 60% et plus de 80% des lots critiques commencent plus tard que leur date prévue dans l'échéancier de référence.

De façon respective, le Tableau 6-3, Tableau 6-4 et Tableau 6-5 rapportent les résultats moyens sur la classe d'instances ($N = 50$ et $K = 3$), la classe d'instances ($N = 50$ et $K = 20$) et la classe d'instances ($N = 10$ et $K = 20$). Les lignes en caractères gras correspondent aux meilleurs résultats. À noter que nous avons éliminé les instances où les lots critiques n'ont aucun prédécesseur puisque la plupart des approches se basent sur l'insertion de marges de temps entre les lots critiques et leurs prédécesseurs (transitifs). Notons aussi que dans le modèle de base Ag, la date d'échéance du projet DE correspond à la durée de projet optimale $Cmax_0$.

Tableau 6-3: Résultats pour la classe d'instances ($N = 50$ et $K = 3$)

Approche/Modèle	Nombre d'instances	$Rep\%(E(C_{max}) > 0)$	$E_{max}(C_{max}\%)$	$E(C_{max})$	$E_{max}(LC)$	$E(LC)$	$Rep\%(JDP\% \leq 20\%)$	$Rep\%(40\% \leq JDP\% \leq 60\%)$	$Rep\%(JDP\% \geq 80\%)$	$E(tps)$
Ag	50	87%	6.1%	0.69	1.67	0.13	51%	45%	4%	0.23
AgR_MgT%	50	24%	2.3%	0.10	0.99	0,05	75%	23%	1%	0,06
AgR_MgSk%	50	21%	2.3%	0,08	0.97	0,04	80%	19%	1%	0,05
AgR_MgSkCf%	50	14%	1.8%	0,04	0.81	0,02	92%	8%	0%	0,02
AgR_MgSkFl%	50	3%	1.5%	0,01	0.94	0,03	88%	12%	0%	0,03
AgR_MgSkFl	50	7%	2,0%	0,03	0.90	0,01	97%	3%	0%	0,02
AgR_MgCmax	50	3%	1.5%	0,01	1.67	0.13	51%	45%	4%	0.11
AgR_Linear	50	19%	2.1%	0,05	0.81	0,02	93%	7%	0%	0,03
AgR_MgCap	50	2%	1.6%	0,01	1.59	0.14	46%	47%	7%	0.12

Tableau 6-4: Résultats pour la classe d'instances ($N = 50$ et $K = 20$)

Approche/Modèle	Nombre d'instances	$Rep\%(E(C_{max}) > 0)$	$E_{max}(C_{max}\%)$	$E(C_{max})$	$E_{max}(LC)$	$E(LC)$	$Rep\%(JDP\% \leq 20\%)$	$Rep\%(40\% \leq JDP\% \leq 60\%)$	$Rep\%(JDP\% \geq 80\%)$	$E(tps)$
Ag	50	94%	10.4%	1.79	2.46	0.31	35%	53%	12%	0.56
AgR_MgT%	50	57%	5.8%	0.80	2.33	0.31	39%	46%	16%	0.39
AgR_MgSk%	50	60%	6.2%	0.83	2,00	0.21	50%	42%	8%	0.32
AgR_MgSkCf%	50	52%	5.7%	0.75	1.85	0.17	65%	31%	4%	0.26
AgR_MgSkFl%	50	38%	5.5%	0.60	2,00	0.20	58%	33%	9%	0.27
AgR_MgSkFl	50	46%	6.1%	0.72	1.69	0.12	76%	19%	5%	0.22
AgR_MgCmax	50	38%	5.7%	0.60	2.46	0.31	35%	53%	12%	0.36
AgR_Linear	50	55%	5.8%	0.70	1.55	0.11	76%	21%	2%	0.21
AgR_MgCap	48	34%	5,0%	0.48	2.51	0.33	29%	55%	16%	0.35

Tableau 6-5: Résultats pour la classe d'instances ($N = 10$ et $K = 20$)

Approche/Modèle	Nombre d'instances	$Rep\%(E(C_{max}) > 0)$	$E_{max}(C_{max}\%)$	$E(C_{max})$	$E_{max}(LC)$	$E(LC)$	$Rep\%(JDP\% = 0\%)$	$Rep\%(JDP\% = 100\%)$	$E(tps)$
Ag	31	99%	23.9%	3.43	1.95	0.71	32%	68%	2,07
AgR_MgT%	31	89%	18,0%	2.22	1.93	0.62	47%	53%	1.42
AgR_MgSk%	31	93%	19.1%	2.60	1.59	0.32	65%	35%	1.46
AgR_MgSkCf%	31	90%	18.1%	2.32	1.47	0.27	70%	30%	1.29
AgR_MgSkFl%	31	86%	18.5%	2.35	2,04	0.70	46%	54%	1.53
AgR_MgSkFl	31	88%	18.3%	2.42	2,04	0.48	58%	42%	1.45
AgR_MgCmax	31	86%	18,0%	2.32	1.95	0.71	32%	68%	1.51
AgR_Linear	31	90%	18.4%	2.45	1.66	0.44	56%	44%	1.45
AgR_MgCap	20	83%	16.4%	1.77	2.27	0.85	38%	62%	1.31

À partir des tableaux précédents, nous faisons les constations principales suivantes :

- Toutes les approches proactives permettent d'améliorer la robustesse des dates jalons par rapport au modèle de base Ag, que ce soit pour les lots critiques ou la date finale du projet.
- Les résultats des différentes approches sont plus rapprochés quand le nombre de lots de travaux N est réduit et le nombre de groupes de ressources K est important.
- Les dépassements sont moins importants pour toutes les approches quand N est important et K est réduit, ce qui confirme l'analyse des graphes sur la Figure 6-11 et Figure 6-12.
- Parmi les approches basées sur l'optimisation des marges de temps, celles qui concentrent les marges à la fin des chemins menant aux dates jalons protègent mieux ces dates comparativement aux approches qui répartissent les marges tout au long des chemins, en particulier quand le nombre de lots est important. On parle ici de l'approche AgR_MgSkCf% qui donne des coefficients plus importants aux derniers lots sur les

chemins, de l'approche $AgR_MgSkFl\%$ et AgR_MgSkFl qui maximisent uniquement la marge précédant directement la date jalon par rapport aux approches $AgR_MgSk\%$ et $AgR_MgT\%$ qui répartissent les marges tout au long des chemins.

- Les meilleures approches quant à la robustesse de la date finale du projet sont les approches : $AgR_MgSkFl\%$, AgR_MgCmax et AgR_MgCap . Nous verrons par la suite que le point commun entre ces approches est qu'elles génèrent les marges de temps directes les plus importantes à la date d'échéance du projet. Nous parlons ici des marges placées devant les lots sans successeur.
- Les meilleures approches quant à la robustesse des dates de début des lots critiques sont les suivantes : $AgR_MgSkCf\%$, AgR_MgSkFl et AgR_Linear . De même, nous verrons que le point commun entre ces approches est qu'elles génèrent les marges de temps directes les plus importantes aux dates de début des lots critiques. Nous parlons ici des marges placées devant les prédécesseurs directs des lots critiques. À noter que l'approche AgR_Linear n'incère pas des marges de temps dans le vrai sens du terme. On se contente d'ajouter 5% à la date finale du projet et aux dates de début des lots critiques et on garde les dates de début des autres lots inchangées. Ensuite, on minimise les dépassements par rapport à ces dates dans l'approche réactive. Ceci engendre indirectement des marges importantes avant les dates critiques sans nécessairement se baser sur une solution de référence faisable. En effet, en essayant de générer des solutions de référence avec ces dates, 311/450 instances sont non réalisables.

Afin de mieux visualiser les différences entre les approches et l'impact des paramètres des instances sur ces différences, dans la Figure 6-13, Figure 6-14 et Figure 6-15, nous représentons par approche la valeur moyenne et l'intervalle de confiance à 95% du dépassement moyen de la date d'échéance du projet $E(Cmax)$ pour les classes d'instances respectives ($N = 50$ et $K = 3$), ($N = 50$ et $K = 20$) et ($N = 10$ et $K = 20$). D'un autre côté, la Figure 6-16, Figure 6-17 et Figure 6-18 représentent par approche la valeur moyenne et l'intervalle de confiance à 95% du dépassement moyen des dates de début des lots critiques $E(LC)$ pour les mêmes classes d'instances.

Les figures 6-13, 6-14 et 6-15 confirment les constatations relevées à partir des tableaux 6-2, 6-3 et 6-4 par rapport à la robustesse de la durée du projet. Ainsi, plus le nombre de lots N est grand

et le nombre de groupes de ressources K est réduit, plus efficaces sont les différentes approches proactives dans la protection de la durée du projet contre les dépassements comparativement au modèle non robuste Ag. Aussi, l'effet de chaque approche est mieux distingué quand N est grand et K réduit. Les approches les plus robustes par rapport à la durée du projet sont : AgR_MgSkFl%, AgR_MgCmax et AgR_MgCap en particulier quand N est grand. Le Tableau 6-6 rapporte pour les trois classes d'instances analysées et pour chaque approche la moyenne sur toute la classe d'instances des marges de temps directes minimales à la date de début du lot fictif final (qui correspond à la date d'échéance du projet) : $minMargSkFl2_{N+1}$ ainsi que la moyenne sur toute la classe d'instances des marges de temps minimales totales sur les chemins menant à la date de début du lot fictif final rapportées aux longueurs minimales des chemins : $minMargSlack_{N+1}$. Les deux variables sont exprimées ainsi :

$$minMargSkFl2_{N+1} = \min_{chm \in Chm_{N+1}} margSkFl2_{N+1,chm} \text{ (Voir section 6.3.5 pour plus de détails)}$$

$$minMargSlack_{N+1} = \min_{chm \in Chm_{N+1}} margSlack_{N+1,chm} \text{ (Voir section 6.3.2 pour plus de détails).}$$

Nous constatons que les approches les plus robustes (en gras sur le tableau) sont les approches qui génèrent les marges de temps les plus importantes à la fin des chemins et non celles qui répartissent les marges tout au long des chemins.

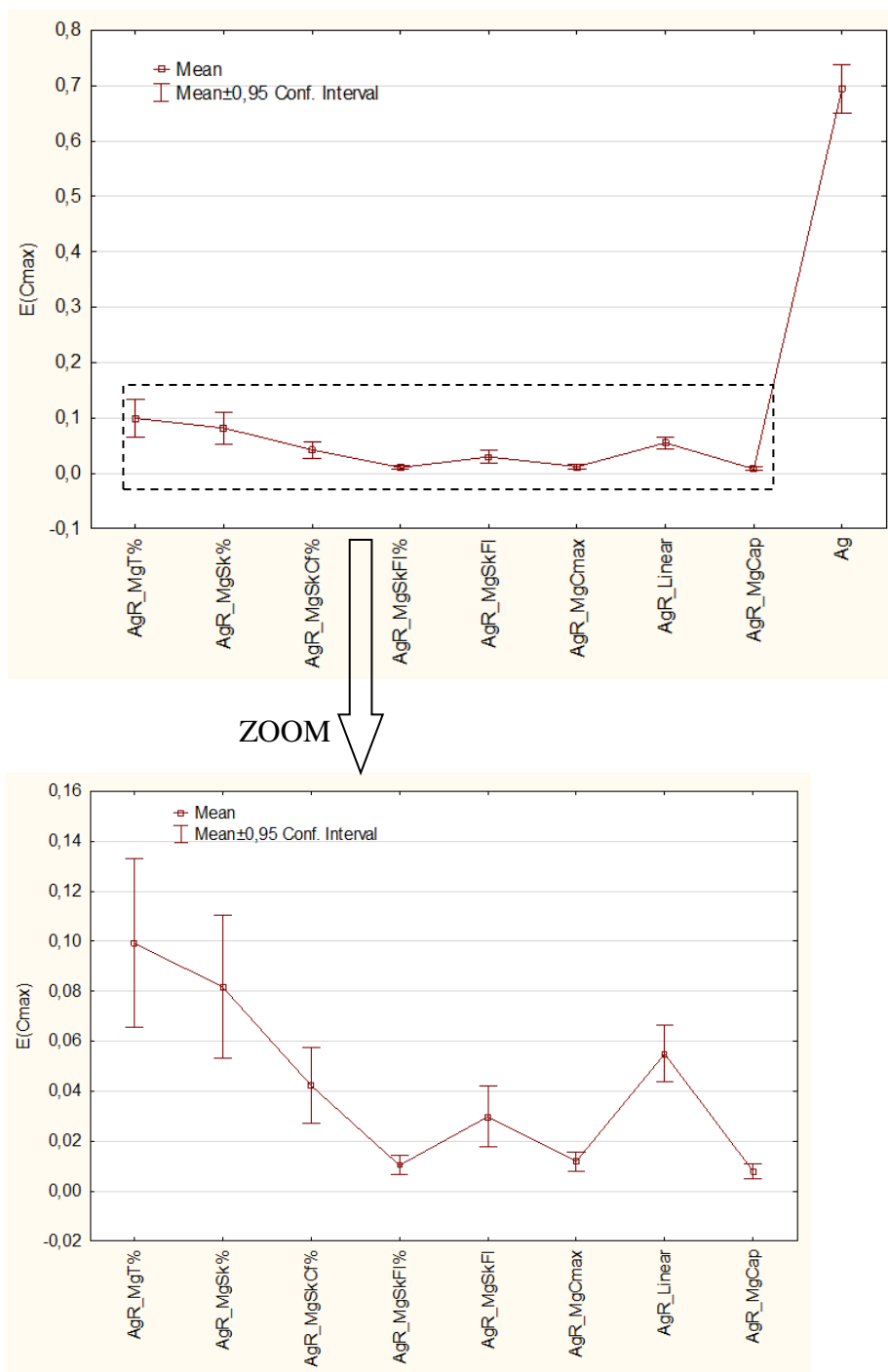


Figure 6-13: Dépassements moyens de la date d'échéance du projet par méthode pour la classe ($N=50$, $K=3$)

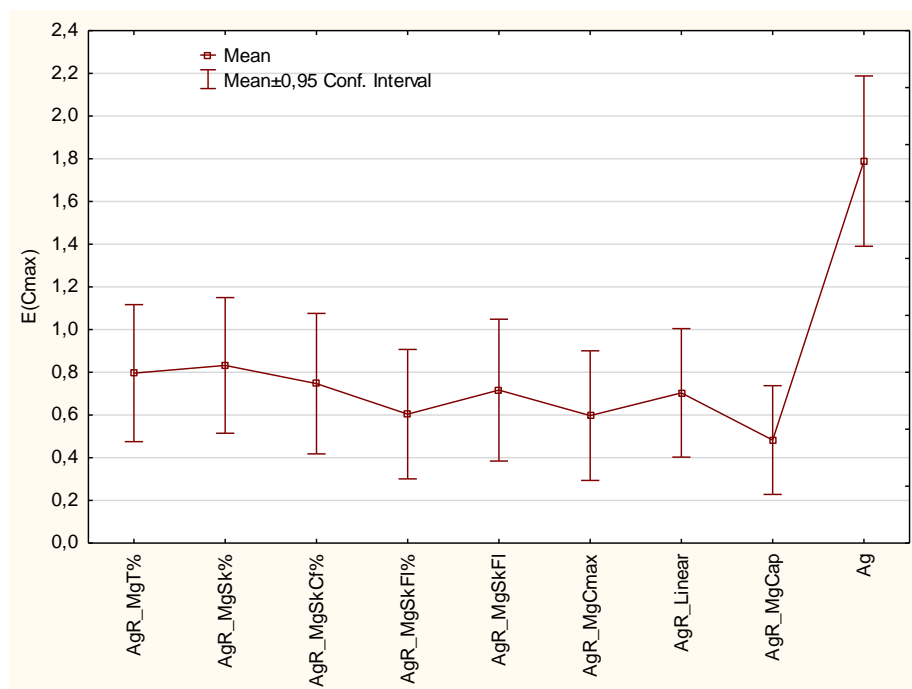


Figure 6-14: Dépassements moyens de la date d'échéance du projet par approche pour la classe ($N=50$, $K=20$)

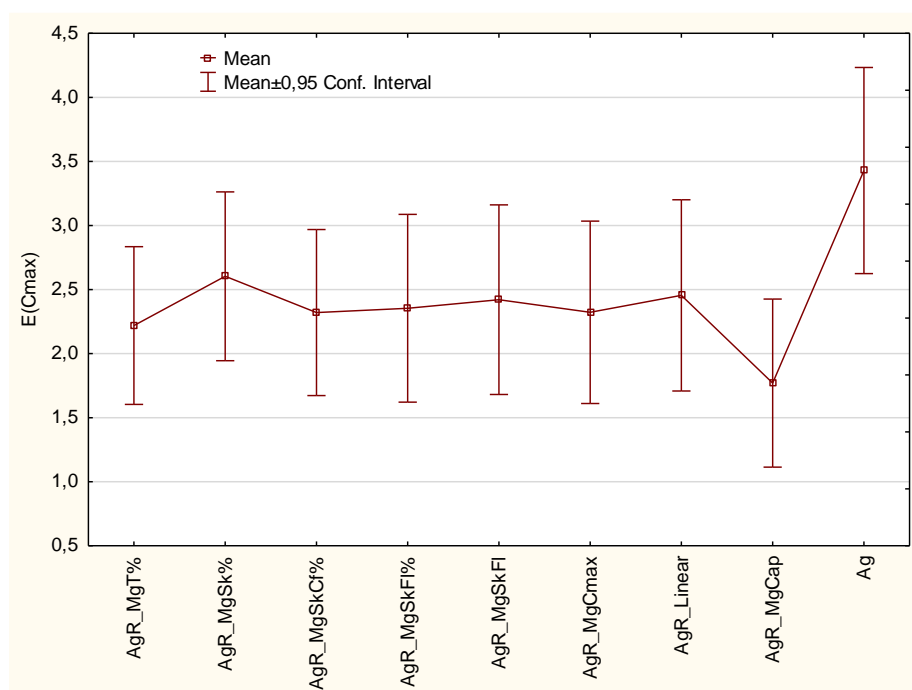


Figure 6-15: Dépassements moyens de la date d'échéance du projet par approche pour la classe ($N=10$, $K=20$)

Tableau 6-6: Marges générées par les approches pour protéger la date d'échéance du projet

Approche	$N = 50, K = 3$		$N = 50, K = 20$		$N = 10, K = 20$	
	$\min MargSkFl_{2N+1}$	$\min MargSlack_{N+1}$	$\min MargSkFl_{2N+1}$	$\min MargSlack_{N+1}$	$\min MargSkFl_{2N+1}$	$\min MargSlack_{N+1}$
AgR_MgT%	0.67	0.04	0.47	0.03	0.71	0.08
AgR_MgSk%	0.83	0.07	0.54	0.07	0.43	0.21
AgR_MgSkCf%	1.04	0.07	0.77	0.07	0.81	0.20
AgR_MgSkFl%	1.55	0.07	1.29	0.06	1.03	0.11
AgR_MgSkFl	1.32	0.07	1.05	0.05	1.01	0.11
AgR_MgCmax	2.03	0.06	1.87	0.06	1.13	0.10
AgR_Linear	-	-	-	-	-	-
AgR_MgCap	2.02	0.06	1.71	0.05	-	-

D'un autre côté, les figures 6-16, 6-17 et 6-18 confirment les constatations relevées à partir des tableaux 6-2, 6-3 et 6-4 par rapport à la robustesse des dates de début des lots critiques (excluant le lot fictif final). L'efficacité des différentes approches proactives basées sur l'ajout de marges de temps pour la protection des dates jalons intermédiaires par rapport à l'approche de base (Ag ou AgR_MgCmax qui sont similaires pour les lots critiques) est augmentée quand N est plus grand et K plus petit. Comme pour la robustesse de la durée du projet, les différentes approches sont mieux différenciées quant à la robustesse des dates de début des lots critiques avec l'augmentation de N et la réduction de K . Les approches les plus robustes quant aux dates de début des lots critiques sont : AgR_MgSkCf%, AgR_MgSkFl et AgR_Linear en particulier quand N est grand. Comme le montre le Tableau 6-7, ce sont les approches qui génèrent les marges de temps les plus importantes à la fin des chemins menant aux lots critiques. À noter que les marges de l'approche AgR_Linear ne sont pas représentées car cette approche se base uniquement sur des dates et non sur une solution de référence réalisable. Les dates majorées des

lots critiques dans cette approche sont toutefois souvent supérieures aux dates des lots critiques dans les échéanciers de référence générés par les autres approches.

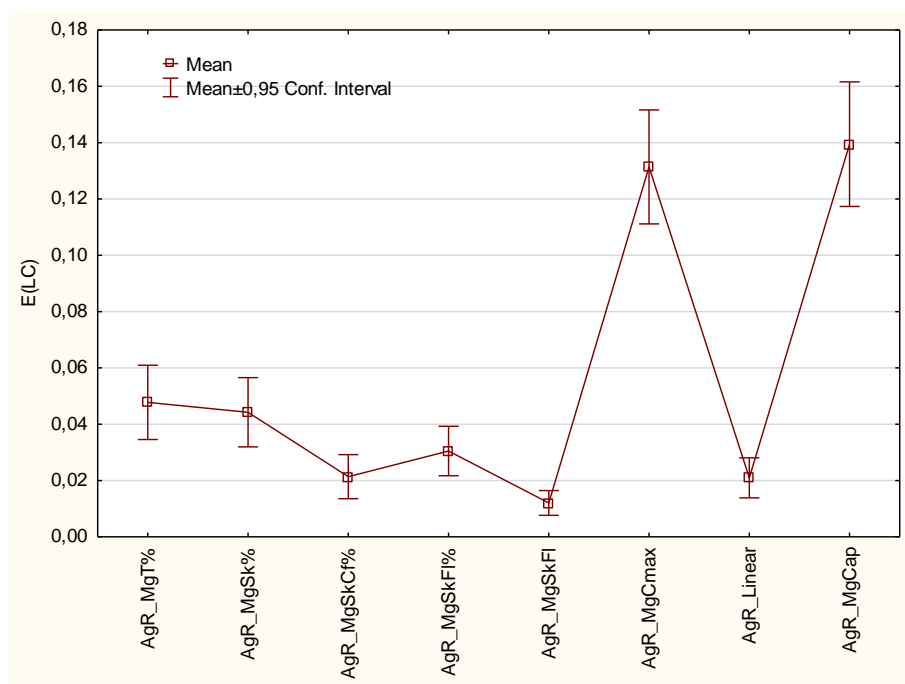


Figure 6-16: Dépassements moyens des dates de début des LC par approche pour la classe ($N=50$, $K=3$)

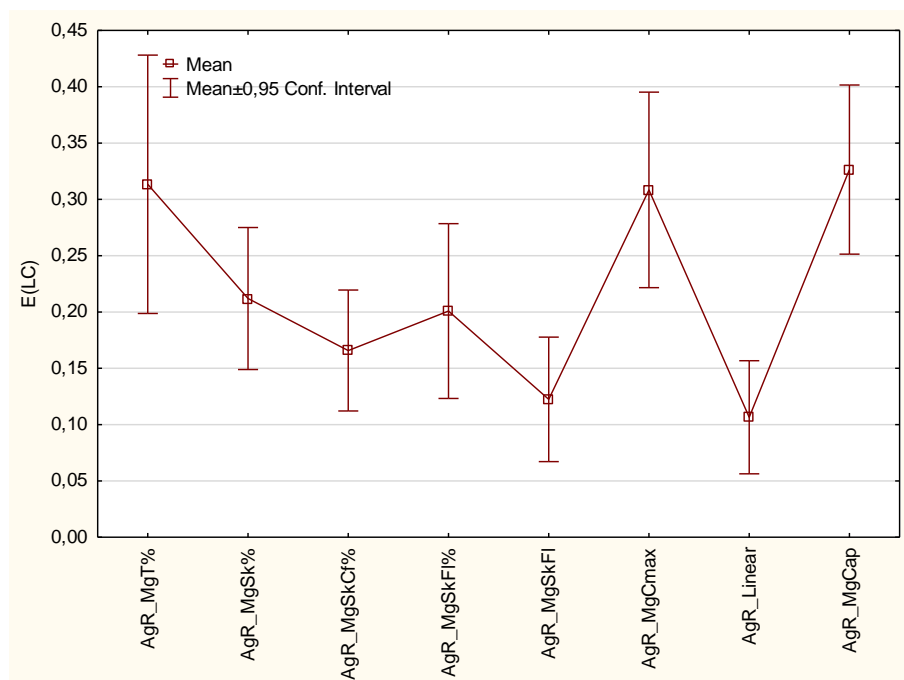


Figure 6-17: Dépassements moyens des dates de début des LC par approche pour la classe ($N=50$, $K=20$)

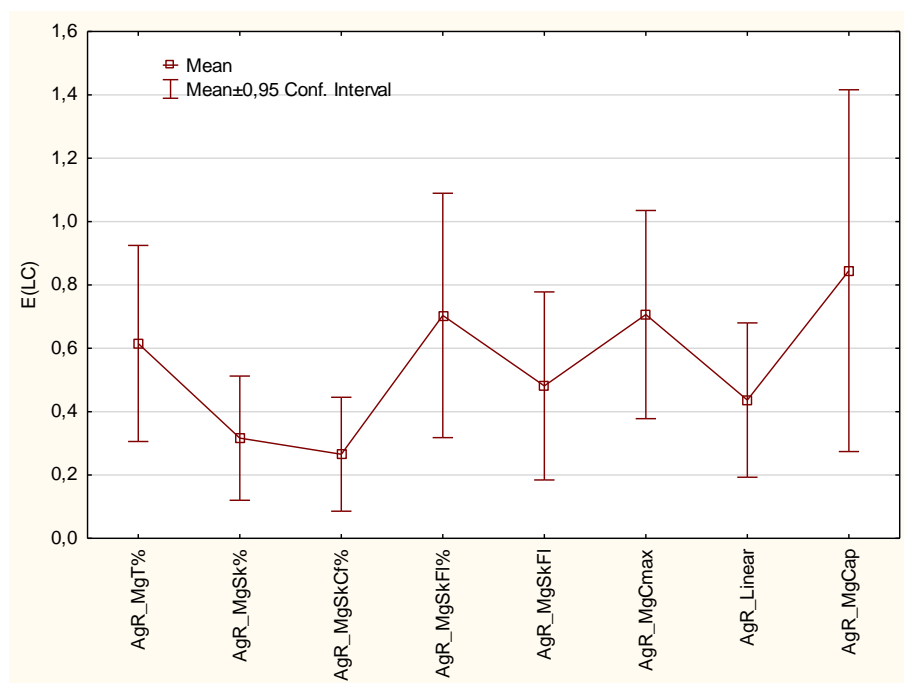


Figure 6-18: Dépassements moyens des dates de début des LC par approche pour la classe ($N=10$, $K=20$)

Tableau 6-7: Marges générées par les approches pour protéger les dates de début des LC

Approche	$N = 50, K = 3$		$N = 50, K = 20$		$N = 10, K = 20$	
	$\min MargSkFl2_j$	$\min MargSlack_j$	$\min MargSkFl2_j$	$\min MargSlack_j$	$\min MargSkFl2_j$	$\min MargSlack_j$
AgR_MgT%	0.22	0.03	0.05	0.01	0.54	0.11
AgR_MgSk%	0.20	0.07	0.11	0.07	1.04	0.49
AgR_MgSkCf%	0.51	0.09	0.25	0.09	1.37	0.40
AgR_MgSkFl%	0.41	0.05	0.30	0.04	0.67	0.20
AgR_MgSkFl	1.32	0.09	1.05	0.07	1.09	0.37
AgR_MgCmax	0.00	0.00	0.00	0.01	0.21	0.09
AgR_Linear	-	-	-	-	-	-
AgR_MgCap	0.00	0.00	0.00	0.01	0.24	0.13

6.4.2.1 Analyse détaillée du comportement des différentes approches

Dans cette section, nous allons effectuer une analyse poussée du comportement des différentes approches par rapport à la durée du projet et les dates de début des lots critiques.

- L'approche AgR_MgCmax se classe parmi les meilleures approches pour la protection de la durée du projet. Elle figure cependant parmi les approches les moins bonnes pour protéger les dates jalons intermédiaires. Ceci est normal puisqu'elle ne protège pas ces dates intermédiaires.
- L'approche AgR_MgSkFl% se classe parmi les meilleures approches pour la protection de la durée du projet. Elle obtient des résultats aussi bons que l'approche AgR_MgCmax avec des marges directes à la date d'échéance plus faibles (voir le Tableau 6-6). Elle est toutefois surclassée par d'autres approches pour les dates jalons intermédiaires. En effet,

étant donné que cette approche rapporte aux durées minimales des chemins, elle va octroyer des marges plus importantes aux longs chemins.

- La performance de l'approche AgR_MgSkCf% quant à la robustesse de la date finale est moyenne dans l'ensemble des approches proactives. Elle est toutefois classée parmi les meilleures approches pour la protection des dates jalons intermédiaires contre les dépassements. Ceci se reflète dans les marges directes aux dates jalons. En effet, on constate que les marges directes précédant les lots critiques générées par cette approche sont parmi les plus élevées (voir le Tableau 6-7). Ceci peut se justifier comme suit. Les marges étant réparties tout au long des chemins, les marges placées devant les différents lots ont plus de chances de contribuer dans la fonction-objectif puisqu'ils peuvent faire partie de plusieurs chemins menant aux dates jalons. Les coefficients plus élevés accordés aux lots sur la fin des chemins vont jouer en faveur de ces derniers. En particulier, cette approche génère les marges directes aux lots critiques les plus élevées quand le nombre de lots est réduit ($N = 10$) puisque la probabilité qu'un lot appartienne à un chemin est plus élevée quand le nombre total de lots est plus faible. Pour le lot fictif final cependant, l'approche AgR_MgSkCf% ne génère pas les marges directes les plus élevées puisque les lots sans successeur contribuent uniquement aux chemins menant au lot fictif final. D'autres approches sont plus efficaces pour protéger la durée du projet comme vu précédemment.
- L'approche AgR_MgSkFl n'est pas classée parmi les meilleures approches pour la protection de la durée du projet, mais elle figure parmi les meilleures pour la protection de des dates jalons intermédiaires. En effet, cette approche génère des marges directes aux dates jalons de façon plus équitable puisqu'elle ne tient pas compte de leur position dans le réseau. C'est pourquoi elle est moins efficace pour protéger la date finale du projet par rapport à d'autres approches maximisant les marges directes rapportées aux longueurs des chemins. Elle reste cependant bien classée dans l'ensemble des approches par rapport à la robustesse de la durée du projet.
- L'approche AgR_MgSk% qui répartit les marges de temps tout au long des chemins avec le même coefficient n'a pas une bonne performance dans l'ensemble des approches

proactives étudiées. En effet, les marges ne sont pas concentrées aux endroits optimaux où on est sûr qu'elles vont servir à protéger les dates jalons, à savoir à la fin des chemins. La seule exception où cette approche est bien classée est dans la protection des dates jalons intermédiaires pour la classe d'instances ($N = 10$, $K = 20$). Comme expliqué pour l'approche AgR_MgSkCf%, ceci se justifie par la plus grande probabilité qu'ont les lots d'appartenir à un chemin et donc de contribuer à la fonction-objectif.

- L'approche AgR_MgT% est parmi les approches les moins efficaces pour la protection et de la durée du projet et des dates de début des lots critiques. Rappelons que cette approche maximise deux types de marges, les marges de durées et les marges de temps entre les lots. Ceci démontre que les marges de durées sont moins efficaces.
- L'approche AgR_MgCap basée sur les marges de capacité se classe parmi les meilleures approches pour la protection de la durée du projet, mais parmi les approches les moins efficaces pour protéger les dates jalons intermédiaires. Sa bonne performance quant à la durée du projet est plutôt justifiée par les marges de temps directes protégeant la date d'échéance et non par les marges de capacité. En effet, la minimisation de la durée du projet avec la contrainte de réduction de 5% de la capacité permet quand même de garder des marges intéressantes entre la fin des travaux et la date d'échéance (voir le Tableau 6-6). Nous en concluons que les marges de capacité sont moins efficaces que les marges de temps pour la protection des dates jalons. Nous notons que 53/450 instances sont non réalisables. Ceci montre que l'augmentation des durées n'est pas proportionnelle à la diminution des capacités dans le problème étudié.
- L'approche intuitive AgR_Linear se comporte parmi les meilleures approches quant à la robustesse des dates de début des lots critiques. En effet, la faisabilité de la solution de référence n'est pas importante dans nos expérimentations puisque la seule information sauvegardée dans les ré-optimisations de l'approche réactive aux différents points de décision correspond aux dates de début et au Cmax. Que ces dates correspondent à une solution réalisable ou non n'est pas important. Cependant, ceci est uniquement possible car la périodicité des prises de décision est de durée 1. Ainsi, dès la fin de la première période de durée 1, une nouvelle solution est générée pour le restant du projet. Si la

périodicité des prises de décision était plus élevée, l'infaisabilité de la solution de référence serait plus problématique. D'un autre côté, l'approche AgR_Linear n'est pas très performante quant à la robustesse de la durée du projet. En effet, étant donné que les dates jalons intermédiaires sont généralement plus majorées que dans les autres approches, ceci laisse moins de marge de manœuvre pour les derniers lots du réseau. Les résultats suivants démontrent ce phénomène. Pour le groupe d'instances ($N = 50$), les dépassements moyens sur toutes les instances pour les lots critiques $J(1)$, $J(2)$, $J(3)$, $J(4)$, $J(5)$ et la durée du projet sont respectivement 0.02, 0.05, 0.05, 0.09, 0.11 et 0.33. Notons que l'ensemble J regroupe les lots critiques classés par numérotation croissante (ex. le lot 12 ne peut pas se retrouver avant le lot 5). Nous voyons ainsi que plus nous avançons dans le réseau, plus grands sont les dépassements car la marge de manœuvre est plus faible. Ceci représente l'inconvénient d'augmenter les dates jalons de façon linéaire.

En conclusion, les meilleures approches quant à la fonction de robustesse globale tout en procurant une bonne robustesse et pour les lots critiques et pour la durée du projet sont les approches AgR_MgSkFl et AgR_MgSkFl%. Les deux approches maximisent uniquement les marges de temps directes aux dates jalons. La différence réside dans le fait que la première génère des marges plus rapprochées alors que la deuxième donne plus d'importance aux jalons situés vers la fin du projet. Le Tableau 6-8 montre les durées moyennes des lots dans l'échéancier de référence sur l'ensemble des instances. On peut voir que les approches AgR_MgSkFl et AgR_MgSkFl% se situent au milieu. Elles ne génèrent ni les durées les plus élevées ni les durées les plus faibles. Ceci montre que la robustesse n'est pas obtenue au profit de durées plus faibles et donc de charges plus élevées.

Tableau 6-8: Durées moyennes dans les solutions de référence des différentes approches

Approche	Moyenne des durées moyennes
AgR_MgT%	3.780
AgR_MgSk%	3.646
AgR_MgSkCf%	3.689
AgR_MgSkFI%	3.742
AgR_MgSkFI	3.747
AgR_MgCmax	3.752
AgR_Linear	-
AgR_MgCap	3.733

6.4.3 Résultats de comparaison avec le modèle désagrégé

Dans cette section, nous allons comparer l'efficacité des différentes approches proactives lorsqu'elles sont appliquées au modèle agrégé Ag et au modèle désagrégé Desg. Dans le premier cas, elles permettent d'anticiper l'effet des incertitudes liées à l'agrégation des capacités et aux charges de travail, tandis que dans le deuxième cas elles protègent uniquement contre les incertitudes liées aux charges de travail. Rappelons que dans le modèle désagrégé, toutes les périodes sont considérées détaillées et les capacités désagrégées connues avec certitude. Les instances de De Boer [1998] sont utilisées pour représenter ces données désagrégées avec les mêmes modifications apportées aux instances agrégées décrites dans la section 6.4.1. Le même cadre expérimental appliqué aux modèles agrégés est utilisé pour les modèles désagrégés (section 6.4.1). Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants pour les classes d'instances respectives ($N = 50$ et $K = 3$), ($N = 50$ et $K = 20$) et ($N = 10$ et $K = 20$). Les appellations des approches sont modifiées en changeant l'acronyme Ag par Desg. Les meilleurs résultats sont représentés en caractères gras.

Tableau 6-9: Résultats du modèle désagrégé pour la classe d'instances ($N = 50$ et $K = 3$)

Approche	Nombre d'instances	$Rep\%(E(C_{max}) > 0)$	$E_{max}(C_{max}\%)$	$E(C_{max})$	$E_{max}(LC)$	$E(LC)$	$Rep\%(JDP\% \leq 20\%)$	$Rep\%(40\% \leq JDP\% \leq 60\%)$	$Rep\%(JDP\% \geq 80\%)$	$E(tps)$
Desg	50	92%	5.9%	0.71	1.51	0.12	53%	45%	2%	0.22
DesgR_MgT%	50	42%	2.9%	0.17	0.94	0.04	82%	17%	2%	0.06
DesgR_MgSk%	50	40%	2.9%	0.17	0.89	0.04	82%	18%	0%	0.06
DesgR_MgSkCf%	50	19%	1.9%	0.06	0.68	0.02	93%	7%	0%	0.02
DesgR_MgSkFl%	50	3%	1.5%	0.01	0.87	0.02	94%	6%	0%	0.02
DesgR_MgSkFl	50	7%	2.0%	0.03	0.79	0.01	99%	1%	0%	0.01
DesgR_MgCmax	50	3%	1.5%	0.01	1.51	0.12	53%	45%	2%	0.10
DesgR_Linear	50	25%	2.1%	0.07	0.69	0.01	95%	5%	0%	0.02
DesgR_MgCap	50	3%	1.7%	0.01	1.44	0.11	60%	37%	2%	0.09

Tableau 6-10: Résultats du modèle désagrégé pour la classe d'instances ($N = 50$ et $K = 20$)

Approche	Nombre d'instances	$Rep\%(E(C_{max}) > 0)$	$E_{max}(C_{max}\%)$	$E(C_{max})$	$E_{max}(LC)$	$E(LC)$	$Rep\%(JDP\% \leq 20\%)$	$Rep\%(40\% \leq JDP\% \leq 60\%)$	$Rep\%(JDP\% \geq 80\%)$	$E(tps)$
Desg	46	89%	7.1%	0.76	1.80	0.14	51%	44%	5%	0.24
DesgR_MgT%	46	50%	3.3%	0.21	1.05	0.05	80%	19%	1%	0.07
DesgR_MgSk%	46	47%	3.4%	0.22	1.05	0.04	85%	14%	0%	0.07
DesgR_MgSkCf%	46	30%	2.6%	0.11	0.83	0.02	93%	7%	0%	0.04
DesgR_MgSkFl%	46	8%	2.1%	0.03	1.11	0.04	87%	13%	1%	0.04
DesgR_MgSkFl	46	16%	2.6%	0.06	1.00	0.02	95%	5%	0%	0.03
DesgR_MgCmax	46	6%	2.2%	0.02	1.80	0.14	51%	44%	5%	0.12
DesgR_Linear	46	25%	2.5%	0.08	0.86	0.02	93%	7%	0%	0.03
DesgR_MgCap	45	8%	2.0%	0.03	1.62	0.11	60%	37%	3%	0.10

Tableau 6-11: Résultats du modèle désagrégré pour la classe d'instances ($N = 10$ et $K = 20$)

Approche	Nombre d'instances	$Rep\%(E(C_{max}) > 0)$	$E_{max}(C_{max}\%)$	$E(C_{max})$	$E_{max}(LC)$	$E(LC)$	$Rep\%(JDP\% = 0\%)$	$Rep\%(JDP\% = 100\%)$	$E(tps)$
Desg	31	79%	11.2%	0.81	1.36	0.25	53%	47%	0.53
DesgR_MgT%	31	46%	7.0%	0.32	1.03	0.13	71%	29%	0.23
DesgR_MgSk%	31	48%	6.9%	0.30	0.91	0.10	78%	22%	0.20
DesgR_MgSkCf%	31	40%	6.3%	0.24	0.75	0.06	87%	13%	0.15
DesgR_MgSkFl%	31	28%	6.0%	0.18	1.19	0.16	69%	31%	0.17
DesgR_MgSkFl	31	32%	6.4%	0.21	1.01	0.09	83%	17%	0.15
DesgR_MgCmax	31	23%	5.9%	0.15	1.36	0.25	53%	47%	0.20
DesgR_Linear	31	31%	6.1%	0.19	0.88	0.09	80%	20%	0.14
DesgR_MgCap	18	22%	4.9%	0.10	1.03	0.12	70%	30%	0.11

En analysant les tableaux précédents et les comparant aux résultats des approches agrégées présentées dans le Tableau 6-3, Tableau 6-4 et Tableau 6-5, nous faisons les constations suivantes :

- Pour la classe ($N = 50$ et $K = 3$), les approches proactives appliquées au niveau agrégé et désagrégré obtiennent approximativement les mêmes résultats. Plus le nombre de groupes de ressources augmente et le nombre de lots diminue, plus les résultats des approches proactives au niveau désagrégré sont meilleurs que celles du niveau agrégé. Le Tableau 6-12 résume ces constations en représentant la moyenne des écarts entre la fonction de dépassements des jalons des approches agrégées et désagrégréées sur les 3 classes d'instances étudiées ($E(tps)$ (approche agrégée) - $E(tps)$ (approche désagrégréée)).
- Nous retrouvons le même comportement des approches proactives au niveau agrégé et au niveau désagrégré. Ainsi les meilleures approches pour le niveau désagrégré par rapport à la robustesse de la durée du projet sont : DesgR_MgSkFl%, DesgR_MgCmax et

DesgR_MgCap. Quant à la robustesse des dates de début des lots critiques, les meilleures approches sont : DesgR_MgSkCf%, DesgR_MgSkFl et DesgR_Linear. Les meilleures approches dans l'ensemble, comme au niveau agrégé, sont les approches qui maximisent uniquement les marges de temps directes aux dates jalons : DesgR_MgSkFl% et DesgR_MgSkFl.

Tableau 6-12: Écarts moyens de la fonction de dépassement des jalons entre les approches agrégées et désagrégées

Approches comparées	Moyenne des écarts de la fonction de dépassement des jalons		
	$N = 50, K = 3$	$N = 50, K = 20$	$N = 10, K = 20$
Ag/Desg	0.00	0.23	1.54
AgR/DesgR_MgT%	-0.01	0.24	1.19
AgR/DesgR_MgSk%	-0.01	0.19	1.26
AgR/DesgR_MgSkCf%	0.00	0.18	1.14
AgR/DesgR_MgSkFl%	0.01	0.17	1.36
AgR/DesgR_MgSkFl	0.00	0.14	1.30
AgR/DesgR_MgCmax	0.01	0.16	1.31
AgR/DesgR_Linear	0.00	0.11	1.31
AgR/DesgR_MgCap	0.03	0.22	0.86

Les écarts entre les résultats des approches proactives du niveau agrégé et celles du niveau désagrégé quand le nombre de lots décroît et le nombre de groupes de ressources croît se justifie par les écarts entre les dates d'échéance fixées aux deux niveaux. Ces dates sont fixées en augmentant de 5% la durée optimale du projet trouvée avec le modèle de base correspondant (Ag au niveau agrégé et Desg au niveau désagrégé). Or, comme le montre le Tableau 6-13, les écarts entre les durées optimales générées aux deux niveaux augmentent avec la diminution de N et l'augmentation de K . Au niveau agrégé, les dates d'échéance sont donc plus serrées qu'au niveau désagrégé. Afin de contourner ce problème. Deux solutions sont envisageables :

- Augmenter davantage la date d'échéance du projet par rapport à la durée optimale au niveau agrégé jusqu'à obtenir des résultats comparables avec le niveau désagrégé. Ceci dépendra probablement du niveau des paramètres N et K . A priori, une légère

augmentation pourrait suffire pour les instances du groupe $N = 50$ où le paramètre K est moins influent (Tableau 6-13).

- Générer l'échéancier initial en adoptant une approche proactive basée sur des réserves de capacité similaire à celle proposée au Chapitre 5 pour la variante *time-driven* du problème RCCP. Ceci permettra de générer des durées optimales de projet $Cmax_0$ plus réalistes et rapprochées de celles du niveau désagrégré. Ensuite, générer un échéancier de référence en appliquant une des approches proactives proposées dans ce chapitre basée sur les marges de temps. À noter que les capacités ne sont pas flexibles dans la variante *resource-driven* traitée dans ce chapitre. Comme on a vu précédemment (approche AgR_MgCap), la durée n'augmente pas de façon linéaire avec la diminution des capacités à cause des contraintes globales des ressources sur les périodes. Ceci peut engendrer des solutions infaisables. Dans ces cas, il faudra augmenter davantage les horizons des instances de projet test.

Tableau 6-13: Écarts entre les durées optimales des modèles de base Desg et Ag

	Moy. $E0(Cmax\%)$	ET. $E0(Cmax\%)$
$N = 10$	7.8%	7.2%
$K = 3$	3.8%	4.3%
$K = 10$	9,0%	6.8%
$K = 20$	10.5%	8.2%
$N = 20$	4.3%	5.3%
$K = 3$	1.4%	1.8%
$K = 10$	4.6%	4.7%
$K = 20$	6.8%	6.6%
$N = 50$	0.6%	1.5%
$K = 3$	0,0%	0,0%
$K = 10$	0.3%	0.7%
$K = 20$	1.6%	2.3%

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un ensemble d'approches proactives destinées au problème *resource-driven* RCCP sous incertitude. La démarche qui a été suivie consiste à déterminer dans

un premier temps les facteurs de risques influençant la robustesse des dates jalons et de proposer dans un second temps des approches proactives qui agissent sur les facteurs de risque les plus pertinents.

Les approches proactives les plus efficaces sont les approches AgR_MgSkFI% et AgR_MgSkFI qui concentrent les marges de temps à la fin des chemins menant aux dates jalons. Ces approches se comportent mieux que les approches basées sur la répartition des marges tout au long des chemins, ou celles qui maximisent les durées des lots sur les chemins menant aux jalons ou encore celles basées sur les marges de capacité. Maximiser les marges de temps rapportées aux durées minimales des chemins permet de donner plus d'importance aux dates jalons plus éloignées dans l'horizon du projet. Maximiser les marges de temps rapportées aux charges totales estimées des chemins est une alternative qui pourrait également donner des résultats satisfaisants. L'approche proactive AgR_MgSkFI qui maximise les marges directes aux dates jalons sans rapporter à une caractéristique du chemin qui précède permet de générer les marges de façon plus équitable. On pourrait toujours jouer sur les coefficients accordés aux jalons en fonction de leur importance.

Sachant que la date d'échéance de projet a été fixée en augmentant de 5% la durée optimale du projet, les approches AgR_MgSkFI% et AgR_MgSkFI sont très efficaces pour anticiper les variations causées par l'incertitude liée aux charges de travail, en particulier quand le nombre de lots de travaux est important. Ces approches sont cependant moins efficaces pour anticiper les variations causées par l'incertitude liée à l'agrégation des capacités. En effet, pour les classes d'instances où l'agrégation des capacités a le plus d'impact sur l'estimation de la durée du projet, les approches agrégées obtiennent des résultats moins bons que les approches désagrégées. Pour pallier à ce problème, on pourrait soit augmenter le pourcentage de majoration de la durée optimale du projet ou bien introduire des marges de capacités dans l'étape de génération de l'échéancier initial afin de trouver des estimations de durées de projet plus réalistes. Ceci représente deux directions de recherche intéressantes.

D'autres directions de recherche potentielles sont :

- Analyser l'impact du niveau de variabilité des charges de travail sur la performance des approches proactives proposées dans ce chapitre.

- Proposer des approches proactives en une seule étape au lieu de deux. Pour ce faire, on pourrait analyser les graphes traçant la valeur de la fonction de dépassement des jalons $E(tps)$ évaluée par simulation en fonction des fonctions-objectif optimisées par les approches proactives pour générer l'échéancier de référence. Ces graphes pourraient nous indiquer la valeur minimale de la fonction-objectif qui assure un niveau jugé adéquat de la fonction de robustesse (opposé de la fonction de dépassement des jalons). L'approche proactive consisterait alors à minimiser la durée du projet en imposant comme contrainte la valeur minimale de la fonction de robustesse approchée (correspondant à la fonction-objectif qu'on cherche à maximiser dans les approches actuelles).
- Optimiser l'approche réactive dans le but de maximiser la fonction de robustesse. En effet, les approches réactives peuvent également influencer la robustesse comme l'explique Van de Vonder et al. [2007b].

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de cette thèse est de proposer des approches de planification tactique adaptées au contexte complexe, incertain et dynamique des grands projets d'ingénierie et de construction. Plusieurs contributions scientifiques et pratiques ont été apportées à la suite de ce travail de recherche qui permettent de répondre à cet objectif.

Tout d'abord, nous avons adapté le concept de niveau de planification tactique au contexte des grands projets d'ingénierie et de construction en l'intégrant dans une structure hiérarchique plus adaptée à ces projets. Nous avons proposé un modèle de planification tactique qui permet de tenir compte de plusieurs niveaux d'agrégation de façon facile à implanter à travers la variation des durées de périodes.

Nous avons aussi démontré que les incertitudes, en particulier celles reliées à l'agrégation des estimations de capacités de ressources sur des périodes étendues impactent négativement la robustesse des échéanciers tactiques si les perturbations qu'elles causent ne sont pas anticipées. Citons à titre d'exemple, pour les instances de projet caractérisées par un nombre élevé de groupes de ressources ($K = 20$), l'augmentation moyenne de la durée du projet d'un pourcentage de 13.6% pour le modèle *resource-driven* RCCP de base proposé comparativement à un pourcentage de 5.4% pour le modèle *resource-driven* RCCP de base désagrégé. Ce résultat est très pertinent pour la pratique des grands projets d'ingénierie et de construction où les niveaux d'agrégation sont souvent établis de façon arbitraire.

De plus, nous avons démontré l'intérêt de l'agrégation des périodes de planification dans la réduction du temps de calcul et de l'effort de planification. Citons à titre d'exemple le gain en temps de calcul d'un facteur de 250 obtenu suite à l'agrégation des périodes par un facteur de 4 pour les instances qui atteignent l'optimalité (dans la limite de temps imposée) dans la résolution du problème *time-driven* RCCP de base. En effet, pour les grands projets, il y a plus d'entités à gérer et les méthodes de résolution ont du mal à résoudre les grands problèmes. En combinant l'agrégation des périodes à une approche de planification proactive, nous profitons des avantages de l'agrégation tout en contrecarrant l'effet négatif de l'incertitude liée à l'agrégation sur la robustesse des estimations produites (coût du projet et dates jalons incluant la date d'échéance de projet). Pour les projets caractérisés par un nombre important de lots de travaux et un nombre réduit de groupes de ressources, le modèle de base *resource-driven* RCCP agrégé est aussi

robuste que le modèle de base désagrégé par rapport aux dates jalons. Ainsi, dans ce contexte, nous n'avons pas besoin d'une approche proactive qui tienne compte de l'incertitude liée à l'agrégation des capacités.

Nous avons également proposé une approche de planification tactique proactive destinée à la variante *time-driven* du problème RCCP basée sur une technique simple d'introduction de réserves de capacités sur les périodes agrégées. Pour les instances caractérisées par un nombre élevé de groupes de ressources, les résultats de cette approche montrent que l'introduction de réserves d'une taille de 20% de la capacité estimée sur les périodes agrégées permet de diminuer considérablement l'effet de l'incertitude liée à l'agrégation des capacités, principale cause de variations des coûts. En effet, les variations des coûts sur les grandes instances sont passées de l'ordre de 50% pour le modèle de base à l'ordre de 4% pour le modèle proactif. Cette approche proactive peut facilement être implantée pour la planification de grands projets d'ingénierie et de construction.

Pour la variante *resource-driven* du problème RCCP, nous avons proposé un ensemble d'approches proactives. Ces approches sont basées sur deux phases d'optimisation. La première permet de générer la durée optimale de projet et la seconde permet d'insérer des marges de temps à travers la maximisation d'un indicateur approché de robustesse. Ainsi, nous évitons le problème relié aux décisions multiples à prendre suite à une insertion linéaire d'une marge de temps en laissant le solveur décider de la meilleure répartition des travaux de sorte à maximiser l'indicateur de robustesse choisi sur la base d'une analyse des facteurs de risque. Conduire une analyse des facteurs de risque permet de proposer un indicateur de robustesse le plus rapproché de la fonction de robustesse réelle qu'on cherche à maximiser, à savoir la minimisation des dépassements réels. Ainsi, nous évitons également les nombres élevés d'itérations et d'évaluations intermédiaires par simulation sur lesquels se basent la majorité des approches proactives destinées au problème RCPSP du niveau opérationnel.

En se basant sur les résultats des expérimentations des approches proactives proposées pour le *resource-driven* RCCP, nous avons démontré que les marges de temps placées entre les lots sont plus efficaces dans la protection des dates jalons des dépassements comparativement aux marges de capacités et aux marges de durées. Ceci montre que la pratique d'ajouter un maximum de

marge dans la durée estimée des lots de travaux n'est pas la mieux adaptée pour la protection des dates jalons au niveau tactique. Nous avons également démontré que la meilleure stratégie d'insertion des marges de temps est de les concentrer à la fin des chemins menant aux dates jalons. Ce résultat permet de montrer que les approches maximisant la robustesse de la solution ne sont pas les mieux adaptées pour protéger les dates jalons au niveau tactique puisqu'elles essaient de placer des marges avant toutes les activités.

Au final, les contributions apportées par notre travail de recherche permettent de rencontrer la plupart des sous-objectifs tracés de la thèse présentés à la section 3.1. Rappelons ces objectifs :

- Sous-objectif 1 : Proposer une approche de planification tactique qui tienne compte de la variabilité dans le niveau de disponibilité et de précision des données selon la durée qui sépare la date d'établissement de l'échéancier de la date où la donnée est prévue avoir lieu/se réaliser.
- Sous-objectif 2 : Mesurer les effets de l'incertitude liée à l'agrégation et aux charges de travail sur la robustesse et performance de l'échéancier développé au niveau tactique.
- Sous-objectif 3 : Proposer des approches proactives de planification tactique qui maximisent la robustesse de la qualité de l'échéancier sous l'influence des incertitudes citées plus haut. La qualité de l'échéancier réfère au coût ou à la durée du projet dépendamment de la fonction-objectif utilisée.
- Sous-objectif 4 : Proposer des approches proactives de planification tactique qui maximisent la stabilité des dates jalons contractuelles pertinentes sous l'influence des incertitudes citées plus haut.

Les sous-objectifs 1 et 2 ont été atteints. Quant aux sous-objectifs 3 et 4, ils ont été partiellement atteints. En effet, les approches proactives développées au Chapitre 6 sont très efficaces pour anticiper les variations causées par l'incertitude liée aux charges de travail, mais sont moins efficaces pour anticiper les variations causées par l'incertitude liée à l'agrégation des capacités. Pour ce faire, des directions de recherche ont été identifiées basées soit sur l'introduction de réserves de capacités pour générer l'échéancier initial ou sur l'étude de l'augmentation nécessaire de la date d'échéance pour contrer l'effet de cette incertitude.

En plus des contributions scientifiques apportées par cette thèse, plusieurs recommandations pratiques peuvent être formulées :

- La proposition de l'utilisation d'une structure de planification hiérarchique plus adaptée au contexte d'exécution en régime accéléré des grands projets d'ingénierie et de construction qui préconise le chevauchement des phases d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction. Nous proposons l'utilisation d'une planification agrégée au niveau tactique pour la production d'un échéancier global du projet. Cet échéancier a pour objectif principal de fixer les dates jalons et d'échéance et le coût du projet. Il est basé sur la planification des lots de travaux avec des estimations grossières des capacités des ressources sur les périodes éloignées dans l'horizon. Une planification plus détaillée est proposée pour la production d'un calendrier de travail pour la prochaine phase du projet. L'affectation des unités de ressources aux activités se fait à un niveau encore plus détaillé pour la/les quelques semaines à venir. Les échéanciers des différents niveaux sont mis à jour de façon périodique avec des intervalles de périodicité plus réduits à mesure que nous descendons dans la structure hiérarchique de planification.
- Au niveau de planification tactique, nous proposons de générer un échéancier qui intègre plusieurs niveaux d'agrégation des périodes de planification. La prochaine phase de projet sera planifiée sur des périodes plus détaillées que les phases ultérieures. Par exemple, la première phase peut être planifiée à la semaine tandis que les phases ultérieures seront planifiées au mois. Quant aux entités planifiées, nous proposons de garder le même niveau d'agrégation sur l'ensemble du projet au niveau tactique, à savoir le niveau des lots de travaux. Dans le niveau inférieur dans la hiérarchie de planification (niveau tactique/opérationnel), nous proposons de planifier les activités qui composent les lots en s'appuyant sur la structure de décomposition des travaux WBS. En effet, la technique de variation du niveau de définition des activités au sein d'un même échéancier a été jugée difficile à implanter et pourrait conduire à un échéancier désordonné [De Leon, 2011].
- Dans cette thèse, nous avons démontré que les échéanciers tactiques des instances de projet partageant les mêmes valeurs de certains paramètres ont des comportements similaires quant à la robustesse et la performance. Les paramètres relevés sont le nombre

de lots de travaux et le nombre de groupes de ressources utilisés dans le projet. Cette constatation peut être exploitée en pratique. En effet, nous pourrions analyser les données historiques des projets réalisés pour étudier la relation entre les paramètres de projet, les tailles des marges de temps et de capacité appliquées ainsi que la robustesse et performance observées de ces projets. Ainsi, on pourra dégager des comportements constants ou dépendant de quelques paramètres qu'on exploitera dans les projets futurs.

- Nous avons démontré que l'emplacement des marges de temps a un impact sur la robustesse des dates jalons. Placer les marges à la fin des chemins menant aux jalons procure la meilleure stabilité à ces dates. Ce résultat peut facilement être traduit en recommandation pratique aux planificateurs qui ont tendance à ajouter des marges de temps aux durées des activités dont ils sont responsables. Cette recommandation présente des interactions avec la méthode de la chaîne critique qui regroupe les marges de sécurité individuelles des activités sur la chaîne critique dans une marge de sécurité globale placée à la fin de cette chaîne. Rappelons que la chaîne critique correspond à l'enchaînement le plus long qui détermine la durée du projet en tenant compte des contraintes de capacité de ressources. En plus de la marge de temps finale placée à la fin du projet, la méthode de la chaîne critique insère des marges de temps à la fin des chemins qui mènent aux activités de la chaîne critique. Cependant, au niveau tactique, nous sommes uniquement intéressés par la stabilité des dates jalons. Disperser les marges de temps pour la protection d'autres dates moins importantes va certes améliorer la stabilité de ces dates mais peut diminuer de la robustesse des jalons comme démontré dans nos expérimentations. Les dates de début des activités ne sont pas fixées au niveau tactique mais plutôt au niveau opérationnel, à plus court terme.
- Nous avons démontré que la majoration de la durée optimale du projet d'un pourcentage aussi réduit que 5% permet d'améliorer considérablement la robustesse des jalons. Dans la littérature, l'ordre de grandeur de la majoration de la durée optimale de projet dans les approches proactives basées sur le problème RCPSP est de l'ordre de 30% [Van de Vonder et al., 2008]. Quant à la méthode de la chaîne critique, la taille des marges de temps est estimée à 50% de la longueur de la chaîne qui précède. Cette différence notable dans la taille nécessaire des marges est principalement due à la flexibilité dans le taux

d'utilisation des ressources par les lots d'une période à l'autre dans le problème RCCP qui n'est pas présente dans le problème RCPSP classique ou dans la méthode de la chaîne critique. Nous recommandons donc de considérer cette flexibilité dans le niveau de planification tactique où les périodes sont agrégées et donc l'hypothèse de la flexibilité du taux d'utilisation des ressources d'une période à l'autre est tout à fait raisonnable.

Finalement, nous concluons par un ensemble de perspectives de recherche basées soit sur des limitations de notre travail de recherche ou sur des avenues intéressantes pour l'étendre :

- Tester les approches sur d'autres instances de projet afin de voir si les résultats dépendent de la méthode de génération des instances. Nous pouvons par exemple adapter les instances de benchmark PSPLIB ou ProGen couramment utilisées pour le problème RCPSP du niveau opérationnel aux caractéristiques du problème RCCP du niveau tactique.
- Tester les approches proactives les plus concluantes sur des projets réels.
- Étudier l'impact du facteur de désagrégation des capacités sur les résultats. Dans cette thèse, le facteur considéré est de $\frac{1}{4}$.
- Tenir compte d'autres formes d'agrégation, notamment l'agrégation des activités détaillées en lots de travaux. À noter cependant que la considération de l'incertitude dans les charges de travail des lots est un moyen indirect de tenir compte de cette incertitude.
- Tester l'impact d'autres paramètres des instances sur les résultats comme la sévérité des contraintes de ressources.
- Approfondir l'analyse des facteurs de risque du Chapitre 6 en essayant par exemple de trouver les caractéristiques des chemins menant aux dates jalons qui influencent le respect de ces dates. Maximiser les marges de temps rapportés à une mesure de ces caractéristiques permettra de mieux protéger les dates jalons les plus à risque de dépassements.
- Optimiser l'approche réactive dans le même but de maximisation de la robustesse des échéanciers tactiques. Une des voies de recherche dans ce sens est d'analyser l'impact de la fréquence des ré-optimisations sur les résultats. Une autre voie de recherche est de

proposer des heuristiques réactives adaptées au problème RCCP qui essayent de se rapprocher du plan de référence (soit par rapport aux dates jalons ou au coût de projet selon l'objectif recherché).

- Proposer des approches réactives qui se rapprochent encore plus du contexte réel en changeant l'hypothèse du moment de connaissance des données réelles. Dans cette thèse, nous supposons connaître les charges réelles des lots à leur date de début et les capacités désagrégées à 4 périodes d'intervalle. Pour les charges par exemple, nous pourrions modéliser un apprentissage plus progressif de la réalité. Au fur et à mesure que l'on avance dans l'exécution du lot, on se rapproche de l'estimation de la charge réelle requise par le lot.

BIBLIOGRAPHIE

- AACE International, I. (2010a). *AACE International recommended practice No. 27R-03 Schedule classification system*. Tiré de <http://www.aacei.org/non/rps/>
- AACE International, I. (2010b). *AACE International Recommended Practice No. 37R-06 Schedule Levels Of Detail - As Applied In Engineering, Procurement And Construction*. Tiré de <http://www.aacei.org/non/rps/>
- Alcaraz, J., Maroto, C., Ruiz, R. (2003). Solving the multi-mode resource-constrained project scheduling problem with genetic algorithms. *Journal of the Operational Research Society*, 54(6), 614-626.
- Alfieri, A., Tolio, T., Urgo, M. (2011). A project scheduling approach to production planning with feeding precedence relations. *International Journal of Production Research*, 49(4), 995-1020. doi: 10.1080/00207541003604844
- Alfieri, A., Tolio, T., Urgo, M. (2012). A two-stage stochastic programming project scheduling approach to production planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(1), 279-290. doi: 10.1007/s00170-011-3794-4
- Alvarez-Valdes, R., Crespo, E., Tamarit, J. M., Villa, F. (2006). A scatter search algorithm for project scheduling under partially renewable resources. *Journal of Heuristics*, 12(1-2), 95-113.
- An, H., Shuai, Q. (2011). *Analysis of risk in EPC project and the countermeasures*. Communication présentée à 2011 International Conference on Management Science and Industrial Engineering (MSIE), Harbin, China (p. 424-428). doi: 10.1109/MSIE.2011.5707753
- Anthony, R. N. (1965). *Planning and control systems : a framework for analysis*. Boston: Harvard University.
- Artigues, C., Roubellat, F. (2000). A polynomial activity insertion algorithm in a multi-resource schedule with cumulative constraints and multiple modes. *European Journal of Operational Research*, 127(2), 297-316.
- Aytug, H., Lawley, M. A., McKay, K., Mohan, S., Uzsoy, R. (2005). Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions. *European Journal of Operational Research*, 161(1), 86-110. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2003.08.027>
- Ballestín, F., Valls, V., Quintanilla, S. (2008). Pre-emption in resource-constrained project scheduling. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 1136-1152. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.052>
- Baloi, D., Price, A. D. F. (2003). Modelling global risk factors affecting construction cost performance. *International Journal of Project Management*, 21(4), 261-269. doi: 10.1016/S0263-7863(02)00017-0
- Bartusch, M., Möhring, R. H., Radermacher, F. J. (1988). Scheduling project networks with resource constraints and time windows. *Annals of operations Research*, 16(1), 199-240.

- Baydoun, G., Haït, A., Pellerin, R., Clément, B., Bouvignies, G. (2016). A rough-cut capacity planning model with overlapping. *OR Spectrum*, 38(2), 335-364. doi: 10.1007/s00291-016-0436-0
- Berezina, E. (2012). *Leadership for successful construction projects: demonstration of the effect of task motivation as opposed to relationships orientation on success in construction projects*. (Blekinge Institute of Technology, Sweden). Tiré de urn:nbn:se:bth-5970
- Berthaut, F., Pellerin, R., Perrier, N., Hajji, A. (2011). *Time-cost trade-offs in resource-constraint project scheduling problems with overlapping modes* (Rapport n° 289524359X). Canada: Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT).
- Berthaut, F., Pellerin, R., Perrier, N., Hajji, A. (2014). Time-cost trade-offs in resource-constraint project scheduling problems with overlapping modes. *International Journal of Project Organisation and Management*, 6(3), 215-236.
- Bianco, L., Caramia, M. (2013). A new formulation for the project scheduling problem under limited resources. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25(1), 6-24. doi: 10.1007/s10696-011-9127-y
- Bouleimen, K., Lecocq, H. (2003). A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version. *European Journal of Operational Research*, 149(2), 268-281. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00761-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00761-0)
- Brčić, M., Kalpić, D., Fertalj, K. (2012). *Resource constrained project scheduling under uncertainty: a survey*. Communication présentée à 23rd Central European Conference on Information and Intelligent Systems, Varazdin, Croatia (p. 401–409).
- Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R., Neumann, K., Pesch, E. (1999). Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research*, 112(1), 3-41. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00204-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00204-5)
- Building, T. C. I. o. (2011). *Guide to good practice in the management of time in complex projects*. London, United Kingdom: Wiley-Blackwell.
- Carvalho, A. N., Oliveira, F., Scavarda, L. F. (2015). Tactical capacity planning in a real-world ETO industry case: An action research. *International Journal of Production Economics*, 167 187-203. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.05.032>
- Carvalho, A. N., Oliveira, F., Scavarda, L. F. (2016). Tactical capacity planning in a real-world ETO industry case: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 180 158-171. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.07.019>
- Cottrell, W. D. (1999). Simplified program evaluation and review technique (PERT). *Journal of construction Engineering and Management*, 125(1), 16-22.
- De Boer, R. (1998). *Resource-constrained multi-project management, a hierarchical decision support system*. (Ph. D. thesis, University Of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.

- De Leon, G. P. (2011). *Scheduling a Project at Different Levels*. Communication présentée à PMICOS 8th Annual Scheduling Conference, San Francisco, CA.
- De Reyck, B., Herroelen, w. (1998). A branch-and-bound procedure for the resource-constrained project scheduling problem with generalized precedence relations. *European Journal of Operational Research*, 111(1), 152-174. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00305-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00305-6)
- Deblaere, F., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2011). Proactive policies for the stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 214(2), 308-316.
- Demeulemeester, E. L., Herroelen, W. S. (1996). An efficient optimal solution procedure for the preemptive resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 90(2), 334-348. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00358-4](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(95)00358-4)
- Derakhshanlavijeh, R., Teixeira, J. M. C. (2016). Cost overrun in construction projects in developing countries, Gas-Oil industry of Iran as a case study. *Journal of Civil Engineering and Management* 1-12.
- Dey, P. K., Tabucanon, M. T., Ogunlana, S. O. (1996). Hierarchical approach to project planning: The case of a petroleum pipeline construction. *Applied Mathematical Modelling*, 20(9), 683-698. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0307-904X\(96\)00049-2](http://dx.doi.org/10.1016/0307-904X(96)00049-2)
- Duchesne, A. (2013). *Ordonnancement de projets avec contraintes de ressources dans un contexte incertain*. (École Polytechnique de Montréal).
- Duy Nguyen, L., Ogunlana, S. O., Thi Xuan Lan, D. (2004). A study on project success factors in large construction projects in Vietnam. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 11(6), 404-413.
- Fündeling, C.-U., Trautmann, N. (2010). A priority-rule method for project scheduling with work-content constraints. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 568-574.
- Gademann, N., Schutten, M. (2005). Linear-programming-based heuristics for project capacity planning. *Iie Transactions*, 37(2), 153-165. doi: 10.1080/07408170590885611
- George, R. T., Back, W. E., Grau, D. (2012). Design Engineer's Role in Managing Front End Planning Information. *International Journal of Applied*, 2(5), 1-16.
- Gibson Jr, G., Kaczmarowski, J., Lore Jr, H. (1995). Preproject-planning process for capital facilities. *Journal of construction engineering and management*, 121(3), 312-318.
- Goldratt, E. M. (1997). *Critical chain*: North River Press Great Barrington, MA.
- Gonçalves, J. F., Mendes, J. J. M., Resende, M. G. C. (2008). A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 1171-1190. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.074>
- Greze, L., Pellerin, R., Leclaire, P. (2011). *Processus d'accélération de projets sous contraintes de ressources avec modes de chevauchement*. Communication présentée à 9ème Congrès International de Génie Industriel, St-Sauveur, Canada.

- Hagstrom, J. N. (1988). Computational complexity of PERT problems. *Networks*, 18(2), 139-147.
- Haït, A., Baydoun, G. (2012, December 10-13). *A new event-based MILP model for the resource-constrained project scheduling problem with variable intensity activity (RCPSVP)*. Communication présentée à Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong.
- Hans, E. W. (2001). *Resource loading by branch-and-price techniques*. (Ph. D. thesis, University Of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.
- Hans, E. W., Herroelen, W., Leus, R., Wullink, G. (2007). A hierarchical approach to multi-project planning under uncertainty. *Omega*, 35(5), 563-577. doi: 10.1016/j.omega.2005.10.004
- Hartmann, S. (2001). Project scheduling with multiple modes: a genetic algorithm. *Annals of Operations Research*, 102(1-4), 111-135.
- Hartmann, S., Briskorn, D. (2010). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 1-14. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.005>
- Herroelen, W. (2005). Project scheduling—Theory and practice. *Production and Operations Management*, 14(4), 413-432.
- Herroelen, W., Leus, R. (2001). On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. *Journal of operations management*, 19(5), 559-577.
- Herroelen, W., Leus, R. (2005). Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European journal of operational research*, 165(2), 289-306.
- Herroelen, W., Leus, R., Demeulemeester, E. (2002). Critical chain project scheduling-Do not oversimplify. *Project Management Journal*, 33(4), 46-60.
- Horman, M., Kenley, R. (1998). Process dynamics: Identifying a strategy for the deployment of buffers in building projects. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1(3), 221-237.
- Jergeas, G. F., Ruwanpura, J. (2009). Why cost and schedule overruns on mega oil sands projects? *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 15(1), 40-43.
- Kaliba, C., Muya, M., Mumba, K. (2009). Cost escalation and schedule delays in road construction projects in Zambia. *International Journal of Project Management*, 27(5), 522-531.
- Kis, T. (2005). A branch-and-cut algorithm for scheduling of projects with variable-intensity activities. *Mathematical programming*, 103(3), 515-539. doi: 0.1007/s10107-004-0551-6
- Kis, T. (2006). Rcps with variable intensity activities and feeding precedence constraints. Dans *Perspectives in Modern Project Scheduling* (vol. 92, p. 105-129): Springer.
- Kolisch, R., Padman, R. (2001). An integrated survey of deterministic project scheduling. *Omega*, 29(3), 249-272.

- Kolisch, R., Sprecher, A., Drexl, A. (1995). Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems. *Management science*, 41(10), 1693-1703. doi: 10.1287/mnsc.41.10.1693
- Kumanan, S., Jose, G. J., Raja, K. (2006). Multi-project scheduling using an heuristic and a genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31(3-4), 360-366.
- Leachman, R., Boysen, J. (1985). An aggregate model for multi-project resource allocation. *Project Management: Methods and Studies*, North Holland, Amsterdam, 11 43-64.
- Lechler, T. G., Ronen, B., Stohr, E. A. (2005). Critical chain: a new project management paradigm or old wine in new bottles? *Engineering Management Journal*, 17(4), 45-58.
- Leus, R. (2003). *The generation of stable project plans. Complexity and exact algorithms*. (Ph. D. thesis, Katholic University Leuven, Belgium). Accessible par Google Scholar.
- Liberatore, M., Pollack-Johnson, B. (1998). Project Management software usage patterns and suggested research directions for future development. *Project Management Journal*, 29(2), 19-28.
- Loots, P., Henchie, N. (2007). Worlds Apart: EPC and EPCM Contracts: Risk issues and allocation. *International Construction Law Review*, 24(1/4), 252.
- Ma, G., Wang, A., Li, N., Gu, L., Ai, Q. (2014). Improved critical chain project management framework for scheduling construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(12), 1–12. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000908
- Masmoudi, M. (2011). *Tactical and operational project planning under uncertainties: application to helicopter maintenance*. (Ph. D. thesis, Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, France). Accessible par Google Scholar.
- Naber, A., Kolisch, R. (2014). MIP Models for Resource-Constrained Project Scheduling with Flexible Resource Profiles. *European Journal of Operational Research*, 239(2), 335 - 348. doi: 10.1016/j.ejor.2014.05.036
- Neumann, K., Schwindt, C., Zimmermann, J. (2003). *Project scheduling with time windows and scarce resources: temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions* (2nd^e éd.). Berlin: Springer Science & Business Media.
- Park, M., Peña-Mora, F. (2004). Reliability buffering for construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 130(5), 626-637.
- Pellerin, R. (1997). *Modèle d'ordonnancement dynamique de projets de réfection*. (Ph.D., Ecole Polytechnique de Montréal (Canada)). Accessible par Dissertations & Theses @ Ecole Polytechnique de Montreal; ProQuest Dissertations & Theses A&I; ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Project Management Institute, I. (2013). *Guide du corpus des connaissances en management de projet: guide PMBOK* (Cinquième édition^e éd.). Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute Inc., [2013] ; ©2013.

- Rankin, L. K., Sloodman, T., ENG, G. F. J. P. (2008). The Industry's Perspective on Workforce Planning for Major Projects. *AACE International Transactions* PM121.
- Russell, M. M. (2013). *Allocation of Time Buffer to Construction Project Task Durations*. (Ph. D. thesis, North Carolina State University).
- Schatteman, D., Herroelen, W., Van de Vonder, S., Boone, A. (2008). Methodology for integrated risk management and proactive scheduling of construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(11), 885-893.
- Spangler, R. (2005). *Front End Loading (FEL) and Process Engineering Workflow*. (The University of Kansas). Tiré de <http://hdl.handle.net/1808/939>
- Speranza, M. G., Vercellis, C. (1993). Project Management and Scheduling Hierarchical models for multi-project planning and scheduling. *European Journal of Operational Research*, 64(2), 312-325. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90185-P](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(93)90185-P)
- Sunke, N. (2009). *Planning of construction projects: a managerial approach*. (Ph. D. thesis, University of Siegen, German). Accessible par Google Scholar.
- The American Institute of Architects. (1996). *Handbook on Project Delivery*. Sacramento, CA.
- Touran, A. (2003). Calculation of contingency in construction projects. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 50(2), 135-140. doi: 10.1109/TEM.2003.810824
- Touran, A. (2009). *A Guidebook for Selecting Airport Capital Project Delivery Methods* (vol. 21): Transportation Research Board.
- Trautmann, N., Baumann, P. (2009). *Resource-constrained scheduling of a real project from the construction industry: A comparison of software packages for project management*. Communication présentée à IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IEEM 2009. (p. 628-632).
- Ustinovichius, L., Barvidas, A., Vishnevskaja, A., Ashikhmin, I. V. (2008, May 20–23). *Multicriteria verbal analysis for construction contracts*. Communication présentée à The 20th International Conference, EURO Mini Conference “Continuous Optimization and Knowledge-Based Technologies” (EurOPT-2008), Neringa, Lithuania (p. 235–240).
- Van de Vonder, S. (2006). *Proactive-reactive procedures for robust project scheduling*. (Ph. D. thesis, Katholic University Leuven, Belgium).
- Van de Vonder, S., Ballestin, F., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2007a). Heuristic procedures for reactive project scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 52(1), 11-28. doi: 10.1016/j.cie.2006.10.002
- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2005). *Heuristic procedures for generating stable project baseline schedules* (Rapport n° 0516). Belgium: K.U.Leuven.
- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2007b). A classification of predictive-reactive project scheduling procedures. *Journal of Scheduling*, 10(3), 195-207. doi: 10.1007/s10951-007-0011-2

- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2008). Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 723-733.
- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W., Leus, R. (2006a). The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling. *International Journal of Production Research*, 44(2), 215-236.
- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Leus, R., Herroelen, W. (2006b). Proactive-reactive project scheduling trade-offs and procedures. Dans *Perspectives in Modern Project Scheduling* (p. 25-51): Springer.
- Van der Weijde, G. A. (2008). *Front End Loading in the Oil and Gas Industry*. (Delft University of Technology).
- Vanhoucke, M. (2012). Schedule Risk Analysis. Dans *Project management with dynamic scheduling: baseline scheduling, risk analysis and project control* (2^e éd., vol. 18, p. 81-100). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Vanhoucke, M. (2013). Project baseline scheduling: An overview of past experiences. *The Journal of Modern Project Management*, 1(2), 18-27.
- Vanhoucke, M. (2015). On the use of Schedule Risk Analysis for Project Management. *The Journal of Modern Project Management*, 2(3), 108-117. Tiré de <http://journalmodernpm.com/index.php/jmpm/article/view/101>
- Vanhoucke, M., Debels, D. (2008). The impact of various activity assumptions on the lead time and resource utilization of resource-constrained projects. *Computers & Industrial Engineering*, 54(1), 140-154. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2007.07.001>
- von Branconi, C., Loch, C. H. (2004). Contracting for major projects: eight business levers for top management. *International Journal of Project Management*, 22(2), 119-130.
- Weglarz, J. (1980). On certain models of resource allocation problems. *Kybernetes*, 9(1), 61-66.
- Wullink, G. (2005). *Resource loading under uncertainty*. (Ph. D. thesis, University of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.
- Wullink, G., Gademann, A., Hans, E. W., Van Harten, A. (2004). Scenario-based approach for flexible resource loading under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 42(24), 5079-5098. doi: 10.1080/002075410001733887
- Yeo, K. T., Ning, J. (2006). Managing uncertainty in major equipment procurement in engineering projects. *European journal of operational research*, 171(1), 123-134.

ANNEXE A – NOMENCLATURE DES VARIABLES ET PARAMÈTRES INTRODUITS DANS L'ALGORITHME DE SIMULATION

Tableau A. 1: Nomenclature des variables et paramètres de l'algorithme de simulation

Variables et paramètres	Description
$TS_i^{cplex}, Tf_i^{cplex}$	Date de début et de fin du lot i selon l'échéancier projeté
TS_i^{tmp}, Tf_i^{tmp}	Date de début et de fin temporaires du lot i
TS_i, Tf_i	Date de début et de fin du lot i dans l'échéancier réalisé
Q'_{ri}	Charge de travail réelle requise du groupe de ressources r par le lot i
α_i	Facteur de variation de la charge du lot i ($Q'_{ri} = \alpha_i * Q_{ri} \forall r \in R$)
xr_{ip}	Intensité réelle du lot i sur la période p
$succ_i$	Successeur du lot i

ANNEXE B – ALGORITHME DE SIMULATION ENTRE DEUX POINTS DE DÉCISION SUCCESSIFS

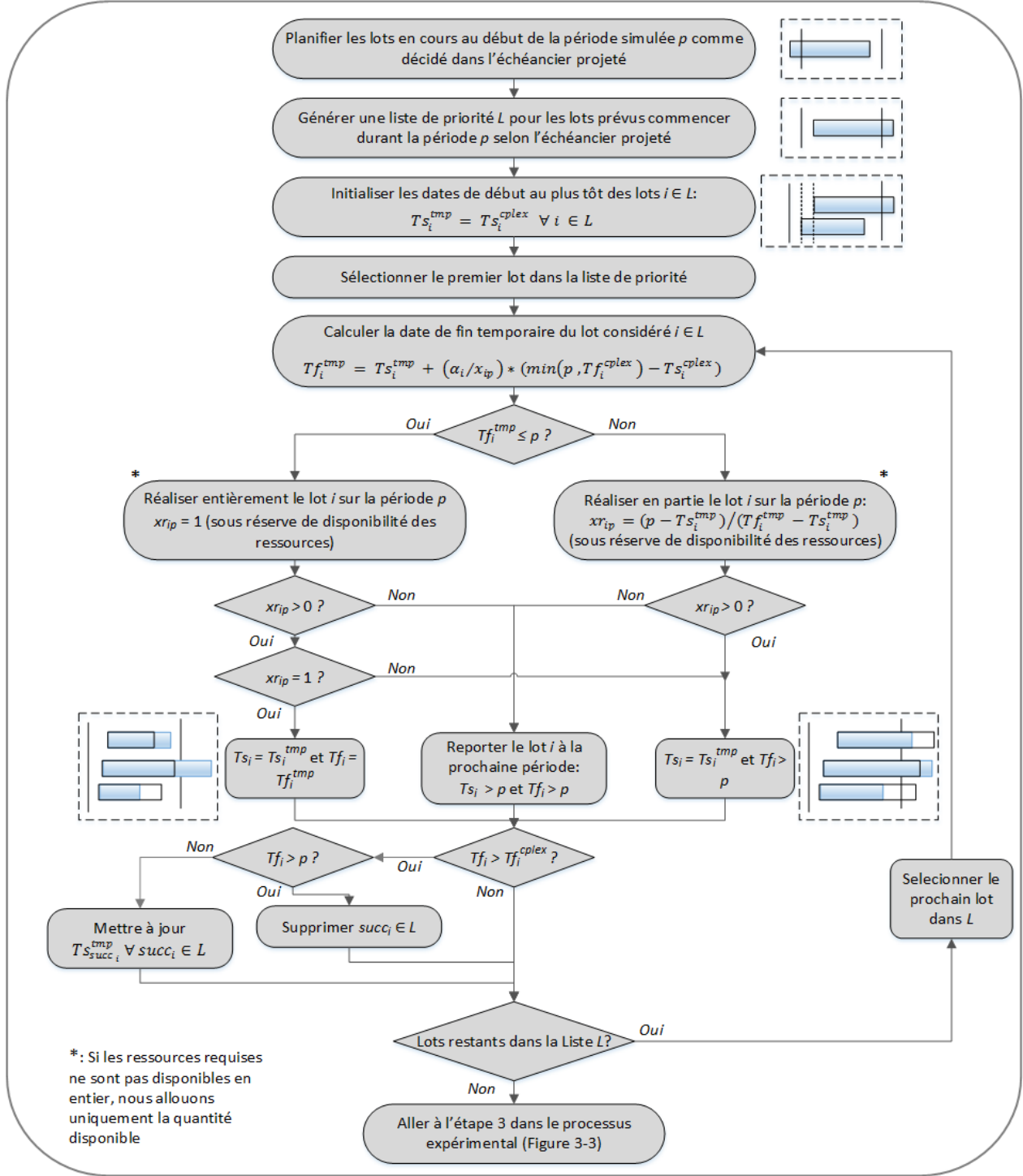


Figure B. 1: Algorithme de simulation